

## شناسایی و تعیین درجه تازگی اناردانه با استفاده از سامانه تصویر برداری حرارتی

محمودرضا گلزاریان<sup>۱\*</sup>، علی محمدزاده<sup>۲</sup>، محمدحسین عباسپورفرد<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت ۱۳۹۳/۰۵/۰۴

تاریخ پذیرش ۱۳۹۳/۱۱/۰۲

### چکیده

شناسایی و جداسازی محصولات کشاورزی تازه و سالم از محصولات مانده و آسیب دیده موجب کاهش تلفات و ضایعات ناشی از گسترش بیماری نمونه‌های ناسالم می‌شود. هدف از این مقاله بررسی کیفیت ماندگاری انار دانه طی دوره نگهداری ۱۵ روزه با استفاده از سامانه تصویربرداری حرارتی می‌باشد. برای دریافت تصاویر حرارتی، انار دانه‌ها با استفاده از روش گرمانگاری فعال در معرض منبع سرد با دمای  $20^{\circ}\text{C}$  - به مدت ۶۰ ثانیه قرار گرفتند. بمنظور استخراج مقادیر دمایی دو روش بخش‌بندی بر مبنای آستانه‌یابی تصاویر حرارتی و ترکیب تصاویر رنگی و حرارتی به روش ثبت تصویر استفاده شد. از ویژگی‌های دمایی مستخرج برای ارزیابی و طبقه‌بندی انار دانه‌های چهار دوره نگهداری در سه بازه‌ی زمانی ۶۰ ثانیه‌ای از تصویربرداری (مجموعاً ۱۸۰ ثانیه تصویربرداری حرارتی) از روش آنالیز تفکیک خطی استفاده شد. میانگین دقت طبقه‌بندی اناردانه‌ها در سه بازه‌ی زمانی ۶۰ ثانیه‌ی اول، دوم و سوم از تصویربرداری حرارتی  $62/1\%$ ،  $72\%$  و  $79/8\%$  بدست آمد. برای طبقه‌بندی دوره‌ها نیز در سه بازه‌ی زمانی ۶۰ ثانیه بهترین دقت طبقه‌بندی در ۶۰ ثانیه‌ی سوم که برای روز اول  $98/7\%$ ، روز پنجم  $69/23\%$ ، روز دهم  $65/38\%$  و روز پانزدهم  $89/85\%$  بدست آمد. نتایج بدست آمده تایید می‌کند که تصویربرداری حرارتی می‌تواند به عنوان یک روش غیر مخرب برای شناسایی درجه تازگی انار دانه در زمان‌های متفاوت نگهداری مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: اناردانه، تصویربرداری حرارتی، درجه‌ی تازگی، عمر ماندگاری

### مقدمه

می‌کنند که در اکثر موارد زمان‌بر می‌باشد. برای درجه‌بندی محصولات کشاورزی فاکتورهای زیادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این فاکتورها در دو گروه فاکتورهای کیفی خارجی و داخلی طبقه‌بندی می‌شوند. سامانه‌های مرئی عوامل خارجی را می‌توانند مورد ارزیابی قرار دهند (Shiranita et al., 1998). اما بررسی کیفیت داخلی محصولات کشاورزی از لحاظ تازه بودن و فراوری را نمی‌توان از روی ویژگی‌های ظاهری مانند شکل، رنگ، اندازه و دیگر خصوصیات ظاهری مورد مطالعه و بررسی قرار داد (Jha et al., 2002). بنابراین محصولات کشاورزی که از لحاظ فاکتور کیفی داخلی معیوب می‌باشند مدت زمان ماندگاری<sup>۴</sup> کمتری نسبت به نمونه‌های سالم دارند زیرا زود فاسد شده و موجب توسعه آلودگی در کل بستر محصول می‌شود (Ohali, 2011).

از رایج‌ترین روش‌های غیرمخرب می‌توان به تصویربرداری بر مبنای مقاومت مغناطیسی هسته<sup>۵</sup>، اشعه ایکس<sup>۶</sup>، ماوراء صوت<sup>۷</sup> و

سالانه حدود ۶۰۰ میلیون تن میوه و سبزی تازه در آسیا تولید می‌شود که این میزان از تولید اهمیت بالای صنعت فراوری را نشان می‌دهد. از میان این حجم از تولید حدود ۳۵ درصد در آسیا در طی مراحل تولید، پس از برداشت، فراوری، توزیع و مصرف به صورت ضایعات هدر می‌رود (FAO, 2011). در اکثر موارد عدم تازگی محصولات کشاورزی میزان فروش و صادرات آن را در حد گسترده‌ای تحت تاثیر قرار می‌دهد. مصرف‌کننده‌ها از لحاظ بینایی قادر به تشخیص کیفیت محصولات نمی‌باشند، اما بعدها واکنش‌های منفی از جانب آنها نسبت به خرید محصولات بوجود می‌آید (Leemans et al., 2002). با وجود آن، شرکت‌هایی برای ارزیابی ویژگی‌های کیفی اعم از تازگی، سالم بودن و از لحاظ مواد خارجی را از طریق آزمون‌های مخرب مانند سفتی، خشک‌شدگی، وزن کردن استفاده

۱، ۲ و ۳- به ترتیب استادیار، دانشجوی کارشناسی ارشد و دانشیار مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

\* - نویسنده مسئول: (Email: m.golzarian@um.ac.ir)

4 Shelf - life

5 Magnetic resonance imaging (MRI)

6 X-RAY

7 Ultrasonic

بیوسنسورها اشاره کرد (Du *et al.*, 2004; Mery *et al.*, 2011). در زمینه کنترل کیفیت درونی میوه‌ها و سبزی‌ها استفاده از تصاویر اشعه ایکس و MRI کارآمدی بیشتری دارند اما هزینه و پیچیدگی کار، استفاده از این روش‌ها را محدود کرده است. در میوه‌ها، سبزی‌ها و مواد غذایی، بررسی وضعیت تازگی و ماندگاری مطابق با تغییرات فیزیکی، بیولوژیکی و شیمیایی از روی برخی پارامترهای مهم تاثیر پذیر اعم از تنش مکانیکی، روشنایی، رطوبت نسبی، دما و pH مورد بررسی قرار می‌گیرند (Hellebrand *et al.*, 2006; Singh *et al.*, 2004). عیوب داخلی معمولاً نتایج تغییرات کالبدی و فیزیولوژیکی بافت درونی اعم از هدر رفتن محتوی رطوبتی، تبدیل شیمیایی، تغییرات رنگی، پیری، حمله میکروارگاناسم‌ها و همچنین صدمه‌های حشرات را سبب می‌شود (Donis-González *et al.*, 2014). در مطالعه‌ای با استفاده از طیف‌سنجی<sup>۱</sup>، میزان براقیت و همچنین وزن کردن، بادمجان را طی دوره‌ی نگهداری ۹۶ ساعته، با محتوی رطوبتی ۸۴-۸۰ درصد در دمای ۲۰°C مورد بررسی قرار دادند، در این تحقیق رابطه‌ای بین وزن و شاخص براق بودن نمونه‌ها پیدا کردند و نشان دادند که با افزایش مدت زمان نگهداری، ماهیت شاخص براقیت و وزن به صورت درجه دوم کاهش می‌باید (Jha *et al.*, 2002). در مطالعه‌ای دیگر برای شناسایی و ارزیابی تاثیر دوره نگهداری پنج روزه بر بافت میوه هلو از بینی الکترونیکی استفاده نمودند. آنها محصول را در روزهای اول، دوم، سوم، چهارم و پنجم نگهداری مورد بررسی قرار داده و با استفاده از روش آنالیز اجزاء اصلی<sup>۲</sup> با دقت ۸۵٪ طبقه‌بندی<sup>۳</sup> کردند (Guohua *et al.*, 2012). از کاربردهای دیگر بینی الکترونیکی<sup>۴</sup> به منظور شناسایی و بررسی کیفی مواد غذایی و محصولات کشاورزی مانند ذرت (Gobbi *et al.*, 2011)، نوشابه (Ragazzo-Sanchez *et al.*, 2008)، شیر (Wang *et al.*, 2010)، روغن خوراکی (Apetrei *et al.*, 2010) می‌توان اشاره کرد. درحال حاضر از گرمانگاری<sup>۵</sup> بعنوان یک شیوه‌ی نسبتاً جدید با هزینه و پیچیدگی به مراتب کمتر نسبت به دو روش مقاومت مغناطیسی هسته و اشعه‌ی ایکس، برای کنترل و پایش وضعیت درونی سطوح محصولات بیولوژیکی استفاده می‌شود. اصولاً گرمانگاری به دو صورت فعال و غیر فعال<sup>۶</sup> اجرا می‌شود. در روش گرمانگاری فعال، از یک منبع انرژی بیرونی بمنظور برانگیختگی انرژی از طریق جذب یا دفع گرما استفاده می‌شود و در روش غیر فعال تنها تصویربرداری حرارتی از نمونه انجام می‌گیرد (Donis-

González *et al.*, 2014). از کاربردهای گرمانگاری مانند ارزیابی کیفی سطحی سیب از نظر لهیدگی می‌توان اشاره کرد (Baranowski *et al.*, 2008). در مطالعه‌ای دیگر بمنظور ارزیابی کیفی سطح دو رقم سیب که در روزهای مختلف چیده شده بودند، به روش گرمانگاری فعال با کاهش دمای نمونه‌ها در طول سه هفته نگهداری مورد بررسی قرار دادند. آنها ثابت کردند دمای سطح نمونه‌ها اختلاف معنی‌داری با دوره‌ی نگهداری نمونه‌ها دارد (Veraverbeke *et al.*, 2006). از دیگر مطالعات در این زمینه می‌توان به، شناسایی آلودگی‌های گندم به روش افت دما از ۳۰°C تا ۵۲±۲°C و تصویربرداری به مدت ۶۰ ثانیه در دمای محیط اشاره داشت (Manickavasagan *et al.*, 2008). هم چنین برای شناسایی ارقام مختلف گندم با استفاده از یک صفحه حرارتی با دمای ۹۰°C به مدت ۱۸۰ ثانیه به فاصله ۱۰ میلی‌متر از سطح نمونه قرار داده شده بود، گندم‌ها قبل و بعد از حرارت و بعد از سرد کردن به مدت ۳۰ ثانیه مورد گرمانگاری قرار گرفتند (Manickavasagan *et al.*, 2010a). از روش سرد کردن نمونه‌ها برای یافتن لهیدگی‌های سطحی گوجه‌فرنگی نیز استفاده شده است (Van Linden *et al.*, 2003). با وجود این کارهای بسیار کمی با استفاده از گرمانگاری برای شناسایی و تشخیص درجه‌ی تازگی و ماندگاری میوه‌ها، انجام گرفته است. میوه‌ی انار در طول مراحل کاشت تا مصرف مشکلاتی را اعم از آفتاب سوختگی، سخت پوست کنده شدن و خارج کردن اناردانه را برای تولید کننده و مصرف‌کننده ایجاد می‌کند بنابراین مشکلاتی از این موارد موجب شده که دستگاه‌های مختلفی برای راحتی و آماده به مصرف بودن<sup>۷</sup> اناردانه ساخته شود (Khzaei *et al.*, 2008). انجام مطالعاتی در این راستا موجب ساده‌تر شدن، حل مشکلات مصرف و کنترل کیفی اناردانه به صورت تازه و بسته‌بندی شده می‌شود. هدف از این مقاله، امکان استفاده از فناوری گرمانگاری فعال<sup>۸</sup> بمنظور مطالعه تاثیر گذشت زمان بر توزیع دمای سطحی اناردانه و دسته‌بندی اناردانه در چهار دوره نگهداری از لحاظ ماندگاری بر مبنای ویژگی‌های حرارتی استخراج شده می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### آماده کردن نمونه‌ها

نمونه‌های تازه میوه‌ی انار کاشمر، رقم خزر از بازار میوه‌ی این شهرستان تهیه شدند. انار دانه‌ها را از داخل میوه خارج کرده و سپس تعداد ۳۵ انار دانه بصورت تصادفی انتخاب و شماره‌گذاری شدند. برای بررسی وضعیت ماندگاری نمونه‌ها لازم بود که نمونه‌ها در طی دوره‌ای از نگهداری ارزیابی شوند. بنابراین اناردانه‌ها به مدت ۱۵ روز

- 1 Spectroscopy
- 2 Principal component analysis (PCA)
- 3 Classification
- 4 Electronic nose (E-nose)
- 5 Thermography
- 6 Passive thermography

7 Ready-to-eat

8 Active Thermography

زمانی که دمای برابر یا مشابه نشان دهد، در تنظیمات گرمانگار، کم یا زیاد می‌کنند تا ضریب گسیلندگی تعیین شده برای اناردانه دمای یکسان و یا با اختلاف کمتری نسبت به ماده آزمون نشان دهد. به کمک روش گفته شده، ضریب گسیلندگی برای انار دانه ۰/۹۵ محاسبه شد که با توجه مطالعات قبلی ضریب گسیلندگی را برای مواد بیولوژیکی بصورت تقریبی بین ۰/۹۳ تا ۰/۹۹ عنوان کرده‌اند، همخوانی دارد (Hellebrand *et al.*, 2006)

در این تحقیق از روش گرمانگاری فعال با منبع انرژی سرمازا برای تصویربرداری حرارتی استفاده شده‌است، بمنظور انتخاب نوع منبع انرژی، پیش تیمارهای مختلف (جدول ۱) مورد ارزیابی قرار گرفت و مناسبترین منبع انرژی برای ادامه تصویربرداری انتخاب گردید. نتایج ارزیابی نشان داد که شوک سرمایی مناسبترین تیمار جهت ادامه تصویربرداری حرارتی می‌باشد، برای تیمارهای دیگر مشکلاتی داشتند که از اعم آنها، طولانی شدن مدت زمان تصویربرداری، عدم مشاهده نمونه‌ها، زمانبر بودن جذب انرژی توسط نمونه‌ها را به هنگام تصویربرداری می‌توان ذکر کرد. در این پروژه، تصویربرداری حرارتی از نمونه‌ها در مدت ۱۸۰ ثانیه بلافاصله بعد سرد کردن، با فاصله زمانی هر ۱۰ ثانیه انجام گرفته‌است (شکل ۱) نشان‌دهنده تعدادی اناردانه از چهار دوره‌ی نگهداری می‌باشد. برخی از پارامترهای محیطی اعم از رطوبت محیط، فاصله‌ی دوربین نسبت به نمونه، دمای محیط و ضریب گسیلندگی به ترتیب ۵۰٪، ۳۰ cm، ۲۲/۵°C و ۰/۹۵ اندازه گیری و کنترل شد.

### پیش پردازش

نقشه‌های حرارتی پس‌زمینه و سطح اناردانه با استفاده از نرم‌افزار تخصصی دوربین گرمایی InfReC Analyzer NS9500 Standard استخراج گردیده و به صورت ماتریس‌های دمایی ذخیره شد. الگوریتم پردازش تصاویر حرارتی در نرم‌افزار متلب (MATLAB R2011) (V7.1) بمنظور فراخوانی، بخش بندی<sup>۱</sup> تصاویر از پس‌زمینه، استخراج مقادیر دمایی و ویژگی‌های دمایی از ماتریس‌های دمایی نوشته شد. ماتریس‌های دمایی بصورت تصاویر خاکستری در متلب فراخوانی می‌شود که مقادیر این تصاویر دمای ثبت شده در هر نقطه از نواحی موجود در تصویر می‌باشد. برای نمایش این تصاویر ابتدا دامنه دمایی نقشه‌ها با رابطه (۱) در دامنه بین ۰ تا ۱ به ۲۵۵ قسمت (تصاویر ۸ بیتی بدون علامت uint8) تبدیل گردید:

$$I_{(i,j)} = \frac{(T_{(i,j)} - T_{min})}{(T_{max} - T_{min})} \quad (1)$$

در دمای ۵°C نگهداری شدند و در انتهای دوره‌های نگهداری ۵ روزه یعنی در روز اول، روز پنجم، روز دهم و روز پانزدهم اندازه‌گیری‌های لازم صورت گرفت. مقاومت به شکست اناردانه‌ها و جابجایی شکست آنها از آزمون فشار مکانیکی و با استفاده از دستگاه اینسترن مدل (SDL ATLAS Model:THE-5000N) اندازه‌گیری شد. و برای اندازه‌گیری محتوای رطوبتی از روش آون (Behdad, Model: oven 70 BSO-2006) و ترازوی دیجیتالی (GF6000) با دقت ۰/۰۱ گرم جهت توزین نمونه‌ها قبل و بعد از خشک شدن استفاده شد.

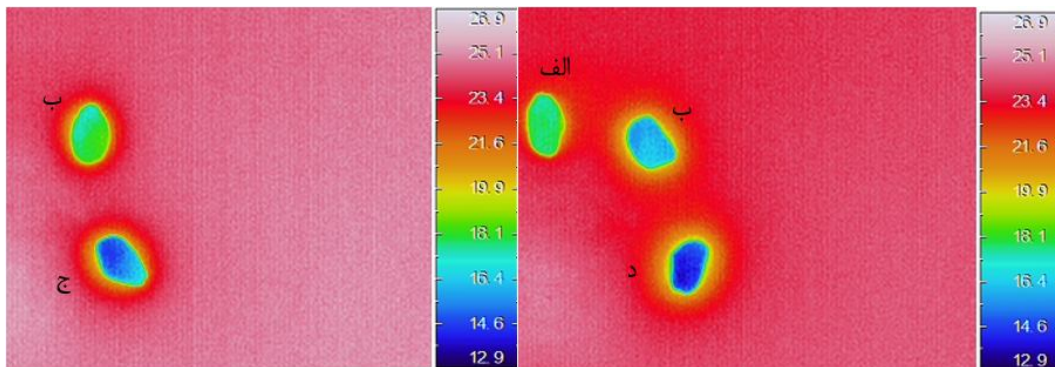
### تصویربرداری حرارتی

برای تصویربرداری گرمایی و مرئی از گرمانگار NEC (مدل THERMO GEAR G100) استفاده شد. این گرمانگار دارای دوربین حرارتی برای تهیه نقشه‌های گرمایی و یک دوربین مرئی برای تصویربرداری همزمان از نمونه‌ها می‌باشد که دوربین رنگی مرئی آن در زیر لنز دوربین حرارتی واقع می‌باشد. دوربین حرارتی مورد استفاده قادر به تصویربرداری در طول موج ۱۴-۸ میکرومتر (این محدوده از طول موج بیشترین دقت گرمانگاری در دمای اتاق را در بردارد (Gowena *et al.*, 2010)، و قدرت تفکیک دمایی ۰/۰۸°C و تهیه نقشه‌های گرمایی با اندازه ۳۲۰×۲۴۰ پیکسل می‌باشد. محدوده‌ی کارکرد دمایی دوربین بین ۴۰- تا ۵۰°C می‌باشد. تصاویر رنگی متناظر با نقشه‌های گرمایی که توسط دوربین مرئی دستگاه گرمانگار از نمونه‌ها گرفته می‌شد در اندازه ۹۶۰×۱۲۸۰ پیکسل بود. در حین تصویربرداری گرمایی و مرئی، دوربین روی پایه ثابت نصب گردید. بمنظور کاهش نویزهای حرارتی محیطی در تصویربرداری حرارتی، از محفظه عایق و بسته استفاده شد. کلیه مراحل تصویربرداری در آزمایشگاه پردازش تصویر دانشگاه فردوسی مشهد انجام گرفت.

در تصویربرداری حرارتی یکی از پارامترهایی که برای اندازه‌گیری دقیق دما لازم می‌باشد ضریب گسیلندگی<sup>۱</sup> می‌باشد. ضریب گسیلندگی اکثر مواد مهندسی در کتاب‌های مرجع مواد مهندسی و جداول ویژگی‌های گرمایی این مواد موجود است. اما منبع معتبری که ضریب گسیلندگی محصولات کشاورزی و مواد غذایی را لیست کرده باشد موجود نمی‌باشد. برای اندازه‌گیری ضریب گسیلندگی، شیوه‌های مختلف و استانداردی وجود دارد. ساده‌ترین روش، استفاده از چسب نواری سیاه عایق که ضریب آن از جداول مربوطه مشخص و برابر (ε=۰/۹۷) می‌باشد. این چسب نواری را در تماس با اناردانه قرار داده و سپس هر دو را در معرض حرارت قرار می‌دهیم، تا به تعادل حرارتی برسند. با استفاده از دوربین حرارتی، ضریب گسیلندگی اناردانه را تا

جدول ۱- تیمارهای مورد استفاده به عنوان منبع برانگیختگی انرژی برای ایجاد تمایز

گسیلندگی	دمای محیط	دما سرد کردن	زمان گرم شدن	زمان سرد کردن
۰/۹۵	۲۲/۵°C	-۲°C	۱۸۰s	شوک سرما ۶۰s
۰/۹۵	۲۲/۵°C	۵°C	۱۸۰s	نگهداری یخچال < ۳۰۰ s
۰/۹۵	۲۲/۵°C	۵°C	۳۶۰s	۶۰s



شکل ۱- تصویر حرارتی اناردانه‌ی چهار دوره‌ی نگهداری: الف) روز اول، ب) روز پنجم، ج) روز دهم، د) روز پانزدهم

مناسب بمنظور استخراج کامل مقادیر دمایی سطح انار دانه با خطا مواجه می‌شود. برای حل این مشکل از ترکیب تصویر مرئی و حرارتی استفاده گردید، با اعمال عملیات پیش پردازش و ترکیب تصویر، ارزش‌های حرارتی سطح نمونه‌ها با دقت بالایی استخراج گردید (شکل ۲). پس از ترکیب تصویر از رابطه‌ی (۲) بمنظور استخراج دقیق و واقعی مقادیر دمایی سطح اناردانه استفاده گردید.

$$Th\_Data = (T_{max} - T_{min}) \cdot (Im\_Fus) + T_{min} \quad (2)$$

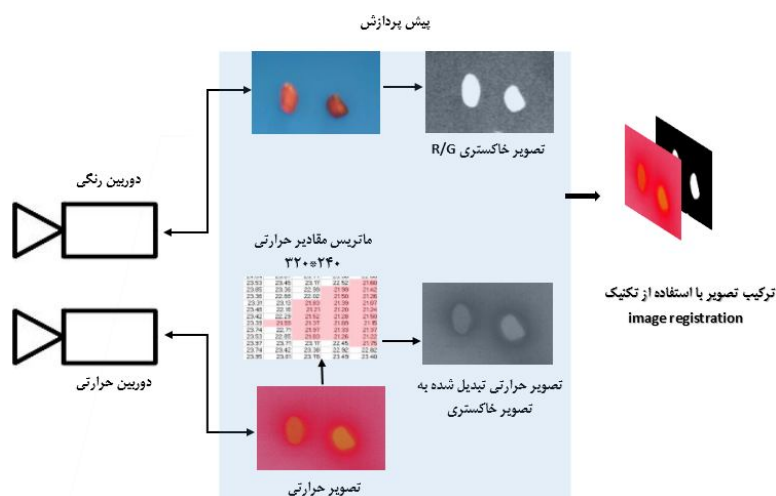
$Im\_Fus$  = تصویر ترکیب شده،  $Th\_Data$  = داده‌های دمایی سطح اناردانه

### استخراج ویژگی‌ها

برای توصیف تصاویر حرارتی از ویژگی‌های دمایی اعم از ویژگی‌هایی که نحوه توزیع دما در یک سطح مشخص که به نام ویژگی‌های بافتی سطح شناخته می‌شود از هیستوگرام و ممان‌های آماری استخراج شده (از هیستوگرام داده‌های دمایی) استفاده شد. این ویژگی‌ها توسط محققان زیادی (Baranowski et al., 2008; Manickavasagan et al., 2008; Van Linden et al., 2003) استفاده شده است.

$I(i, j) = I(i, j)$  مقدار جدید نقطه  $(i, j)$  در تصویر خاکستری بدست آمده،  $T(i, j)$  دمای نقطه  $(i, j)$  در نقشه گرمایی،  $T_{min}$  و  $T_{max}$  به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار دما در نقشه گرمایی گرفته شده از نمونه.

برای بخش‌بندی دو روش به کار برده شد. یکی استفاده از تصاویر حرارتی، بدین صورت که از روش بخش‌بندی بر مبنای حد آستانه دمایی برای جداکردن انار دانه از پس‌زمینه استفاده شود. بخش‌بندی در این شیوه با تعیین حد آستانه‌ی مناسب بر روی تصویر خاکستری انجام می‌گیرد. روش دوم بخش‌بندی بر مبنای ترکیب تصویر مرئی و حرارتی می‌باشد. با توجه به تحقیقات قبلی، ترکیب تصاویر در طول موج‌های متفاوت از یک صحنه باعث بهبود قابلیت بینایی و درک ویژگی‌های موجود در تصویر مرکب تولید شده برای تصمیم‌گیری هوشمند می‌شود (Goshtasby et al., 2007). برای انجام ترکیب تصویر از روش ثبت تصویر استفاده شد، این روش برای تبدیل مجموعه‌ی داده‌ها در یک مختصات از دو یا چند تصویر از جهت‌های متفاوت یا مشترک ولی در دامنه طیف‌های متفاوت می‌باشد بدین ترتیب امکان استخراج دقیق ویژگی‌های چند بعدی مکانی یا طیفی از یک صحنه یا شیء ایجاد می‌گردد (Yang et al., 2012). در این تحقیق با گذشت زمان طی تصویربرداری حرارتی، نمونه‌ها هم دما و در نتیجه هم‌رنگ با پس‌زمینه می‌شدند. بنابراین برای تعیین آستانه



شکل ۲- مراحل ترکیب تصویر رنگی و حرارتی

می‌شود.

### طبقه‌بندی

مرحله طبقه‌بندی یا مرحله شناسایی روشی برای آنالیز کیفی تصویر بر مبنای اندازه‌گیری ویژگی‌ها با استفاده از آمار، احتمال و ویژگی‌های هندسی و طراحی الگوریتم‌ها می‌باشد (Zhang *et al.*, 2014). محققان زیادی از روش‌های مختلف طبقه‌بندی اعم از شبکه عصبی مصنوعی، روش آنالیز تفکیک خطی<sup>۷</sup> و آنالیز تفکیک درجه دوم<sup>۸</sup> که از جمله روش‌های پر کاربرد در طبقه‌بندی و شناسایی نمونه‌ها با استفاده از ویژگی‌های مستخرج است، استفاده کرده‌اند (Luo *et al.*, 2011; Manickavasagan *et al.*, 2010b; Ohali, 1999). در این مقاله بمنظور طبقه‌بندی انار دانه‌ها بر مبنای ویژگی‌های حرارتی استخراجی از روش آنالیز تفکیک خطی با استفاده از نرم افزار SPSS (Version 16) استفاده گردیده است. در این روش ویژگی‌های استخراج شده از چهار گروه انار دانه در فاصله زمانی ۶۰ ثانیه نسبت به همدیگر، در سه بازه زمانی تحلیل و طبقه‌بندی شدند. برای اعتبارسنجی آنالیز تفکیک دوره‌ها از روش واریانس با شیوه Leave-one-out در نرم افزار SPSS استفاده گردید.

### نتایج و بحث

در این تحقیق با استفاده از پیش آزمون‌های مختلف (جدول ۱)، شوک سرمایی °C ۲- به مدت ۶۰ ثانیه بعنوان منبع انرژی بیرونی انتخاب شد. با استفاده از روش ماده آزمون، ضریب گسیلندگی انار دانه ۰/۹۵ اندازه‌گیری شد. تعداد ۳۵ نمونه انار دانه طی ۱۵ روز نگهداری،

در این تحقیق از تصاویر حرارتی بطور میانگین ۳۰۰ پیکسل تشکیل‌دهنده‌ی سطح انار دانه از هر تصویر حرارتی برای استخراج مقادیر دمایی و ویژگی‌های حرارتی استفاده شده است. ویژگی‌های مورد استفاده میانگین مقادیر دمایی پیکسلی، انحراف معیار، میانه، بیشترین، کمترین دما و اختلاف بین آنها، واریانس<sup>۱</sup>، ممان سوم<sup>۲</sup>، میانگین سطوح خاکستری، همواری<sup>۳</sup>، همگنی<sup>۴</sup> و آنتروپی<sup>۵</sup> می‌باشند.

### تئوری

مطابق با تحقیقات انجام گرفته در زمینه گرمانگاری فعال برای توصیف توزیع تغییرات حرارتی محصولات کشاورزی از ضریب نفوذ حرارتی<sup>۶</sup> استفاده می‌شود. از آنجایی که که انتقال حرارت حاصل از تیخیر، در میدان دمایی گذرا در داخل میوه اتفاق می‌افتد، از ضریب نفوذ حرارتی رابطه (۳) برای توصیف آن استفاده می‌شود (Baranowski *et al.*, 2009; Gowen *et al.*, 2010).

$\nabla T$  گرادیان دما در طول زمان (°C)، ضریب نفوذ حرارتی (m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>)، t زمان سپری شده (s) می‌باشد.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad \text{رابطه (۳)}$$

در مواد غیربیولوژیک افزایش دما مطابق با منبع انرژی خارجی با استفاده از معادلات تجربی می‌تواند محاسبه شود. اما امکان این اندازه‌گیری در مواد بیولوژیکی به راحتی مقدور نمی‌باشد. اما تغییر در بافت نمونه‌ها موجب تغییر در ضریب نفوذ حرارتی ماده‌ی مورد نظر

- 1 Variance
- 2 Third moment
- 3 Smoothness
- 4 Homogeneity
- 5 Entropy
- 6 Thermal Diffusivity

7 Linear Discriminant Analysis (LDA)

8 Quadratic Discriminant Analysis (QDA)

از نرم افزار SPSS (version 16) به روش گام به گام<sup>۱</sup> برای انتخاب بهترین ویژگی‌ها برای پیش‌بینی و طبقه‌بندی نمونه‌ها استفاده گردید، روش گام به گام مدلی رگرسیونی ایجاد می‌کند که بصورت خودکار متغیرهای مستقل را بر مبنای رتبه‌ی موثر آنها در پیش‌بینی نتایج مورد استفاده قرار داده و یا حذف می‌کند. با استفاده از روش آنالیز تفکیک خطی دقت طبقه‌بندی اناردانه‌ها بر مبنای ویژگی‌های استخراج شده در سه بازه‌ی زمانی ۶۰ ثانیه‌ی اول، دوم و سوم به ترتیب ۶۲/۱٪، ۷۲٪ و ۷۹/۸٪ بدست آمد. دقت طبقه‌بندی گروه‌های نگهداری شده در بازه‌های زمانی در (شکل ۴) آورده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، طبقه‌بندی اناردانه‌ها با گذشت زمان در مرحله گرم شدن نمونه‌ها عملکرد مناسبی نسبت به زمان‌های اولیه دارد.

ویژگی‌های متفاوت دمایی اناردانه‌ها در طول زمان نگهداری، ناشی از تغییرات محتوی رطوبتی و بافتی می‌باشد. در نتیجه تغییرات بافت موجب تغییر واکنش اناردانه نسبت به تغییرات محیطی می‌شود. این تغییرات تابع دمای نمونه‌ها و نسبت گرم شدن آنها می‌باشند.

تبادل حرارتی نمونه‌ها طی مرحله‌ی گرم شدن در بازه‌ی دمایی ۱۵ °C تا ۲۵ °C بین سطح اناردانه و محیط انجام گرفت که کمترین پراکندگی و اختلاف دما نسبت به محیط مربوط به دوره‌ی اول و بیشترین پراکندگی و اختلاف دمایی به دوره‌ی چهارم نگهداری مربوط می‌شد. در ثانیه‌های اول از تصویربرداری حرارتی اناردانه‌های دوره‌ی پنجم، دهم و پانزدهم را خیلی نزدیک به هم نشان می‌داد اما در ثانیه‌های پایانی گرم شدن دوره‌ها به نسبت جذب و دفع شوک سرما بین سطح نمونه و محیط به ترتیب دوره‌ی اول، چهارم، دهم و پنجم گرم‌تر بودند. بر مبنای نتایج حاصل می‌توان زمان گرم شدن را به عنوان پارامتر مهم در شناسایی دقیق دوره‌های نگهداری و متناسب با آن درجه تازگی محصولات بکار برد.

بمنظور استخراج دقیق ویژگی‌های دمایی استفاده از روش ترکیب تصویر مرئی و حرارتی موجب کاهش نرخ خطا در داده‌های دمایی می‌شود. با استفاده از آنالیز تفکیک خطی، دقت طبقه‌بندی اناردانه‌های روز اول در تمام بازه‌های زمانی تقریباً ۱۰۰٪ و اناردانه‌های روز پنجم، دهم و پانزدهم نیز در ۶۰ ثانیه آخر، بیشتر از ۶۵٪ را نتیجه دادند. از عوامل کنترل نشده در سامانه نگهداری کنترل میزان رطوبت محفظه نگهداری در دمای ۵ °C در طول پانزده روز نگهداری می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهند تصاویر حرارتی ابزاری مناسب برای ارزیابی و شناسایی اناردانه‌های تازه از مانده با استفاده از گرمانگاری فعال

تصویربرداری شدند. برای هر اناردانه در هر دوره ۱۸ تصویر حرارتی و در کل ۲۵۲۰ تصویر حرارتی تهیه شد. (جدول ۲) مقادیر میانگین برخی از پارامترهای فیزیکی و مکانیکی اناردانه‌ها آورده شده است. برای جداسازی اناردانه‌ها از پس زمینه‌ی تصاویر رنگی از نسبت باند قرمز (R) به باند سبز (G) یعنی R/G که توسط (Blasco et al., 2009) برای درجه‌بندی اناردانه‌ها و مواد خارجی پیشنهاد شده بود، استفاده گردید. با استفاده از نسبت مؤلفه‌ی رنگی قرمز به سبز می‌توان عملکرد بخش‌بندی مناسبی را برای جداسازی اناردانه از پس زمینه با کمترین نویز بدست آورد. در نهایت از ترکیب تصویر حرارتی و رنگی با استفاده از روش ثبت تصویر، مقادیر دمایی سطح اناردانه‌ها، بطور دقیق استخراج گردید.

گرادین دما نسبت به زمان برای اناردانه‌های یک روزه و پنج روزه مشابه یکدیگر بدست آمد (شکل ۳-الف، ب). این رفتار نمونه‌ها به احتمال زیاد ناشی از بافت سالم این نمونه‌ها می‌باشد که نسبت به منبع انرژی، حساسیت کمتری از خود نشان می‌دهند، اما در مورد اناردانه‌های کهنه‌ی ده روزه و پانزده روزه، گرادین دما نسبت به زمان به مراتب بیشتر بوده است (شکل ۳-ج، د).

این تغییرات و پراکندگی توزیع دما نشان می‌دهد که هرچه بافت سطحی نمونه‌ها کهنه‌تر باشد، نسبت به محیط اطراف تاثیرپذیرتر بوده و واکنش به تغییرات انرژی با شدت بیشتری قابل ثبت است. دمای پایین اناردانه‌های روز دهم و پانزدهم ناشی از تبخیر زیاد رطوبت از سطح و ضریب نفوذ حرارتی بیشتر نسبت به دو دوره اول و پنجم است. علت وجود تفاوت در گرادین گرمایی نمونه‌های تازه و کهنه را می‌توان در تفاوت ضریب نفوذ حرارتی یافت این نمونه‌ها جستجو کرد. ضریب نفوذ حرارتی بالا در بافت ناسالم موجب انتقال حرارت سریعتر به قسمت‌های داخلی یا از دست دادن سریعتر گرما از داخل محصول می‌شود و در نتیجه، نمونه‌ها سریعتر سرد یا گرم می‌شوند. برعکس این حالت، برای بافت‌های سالم اناردانه‌ی روز اول و پنجم صدق می‌کند که در آنها از دست دادن گرما در محیط سرد و گرفتن گرما در محیط گرم به آهستگی صورت می‌گیرد.

وزن اناردانه‌ها در چهار دوره بطور میانگین ۰/۲۵، ۰/۲۳، ۰/۲ و ۰/۱۶ گرم و میانگین دمای سطحی آن‌ها در بیست ثانیه اول ۲۱/۹۸، ۱۶/۶۳، ۱۶/۳۵ و ۱۶/۵۱ °C و در بیست ثانیه پایانی تصویربرداری به ترتیب ۲۴/۹۸، ۱۹/۵۸، ۲۰/۸۸ و ۲۲/۲۱ °C به ترتیب برای اناردانه‌های روز اول، پنجم، دهم و پانزدهم اندازه گیری شد.

### طبقه‌بندی

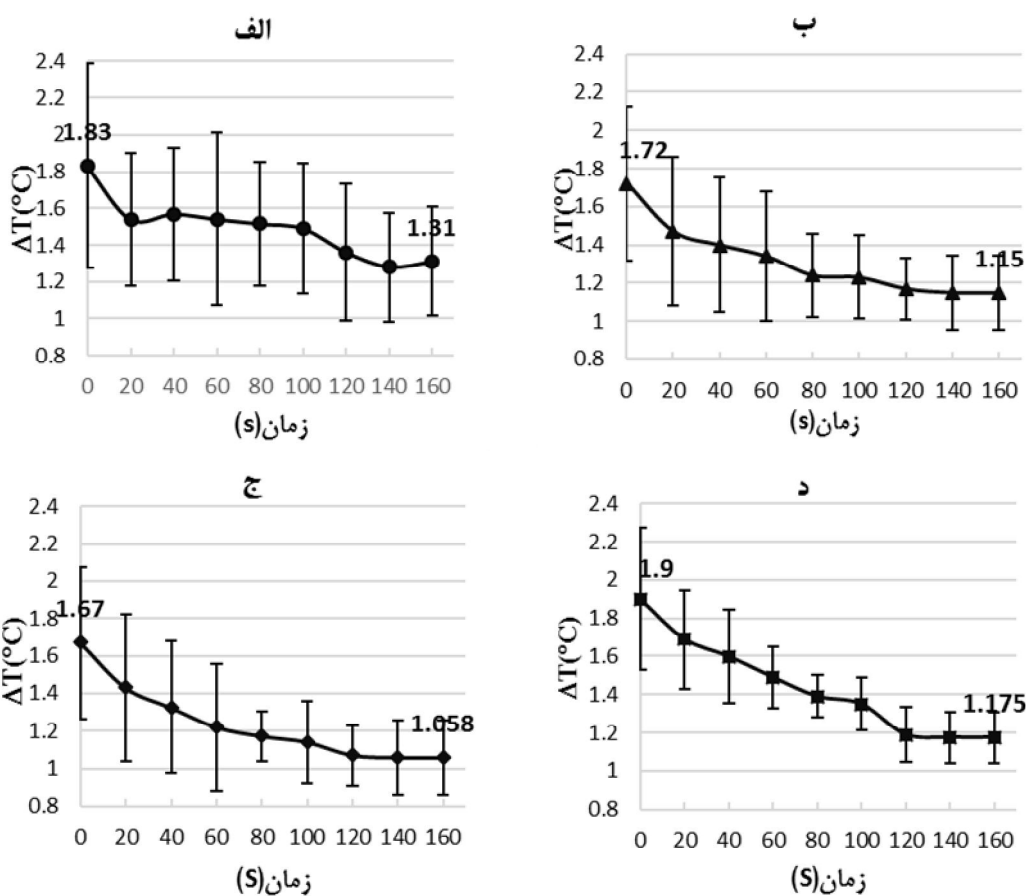
در این مقاله از ۱۲ ویژگی دمایی استخراج شده از تصاویر حرارتی، در مدل طبقه‌بندی استفاده گردید. برای رده‌بندی ویژگی‌ها با استفاده

انجام گرفته شده می‌توان روش گرم‌نگاری را روشی غیرمخرب و مفید برای ارزیابی محصولات کشاورزی و بهبود سامانه‌های کنترل کیفی و امنیت مواد غذایی معرفی کرد.

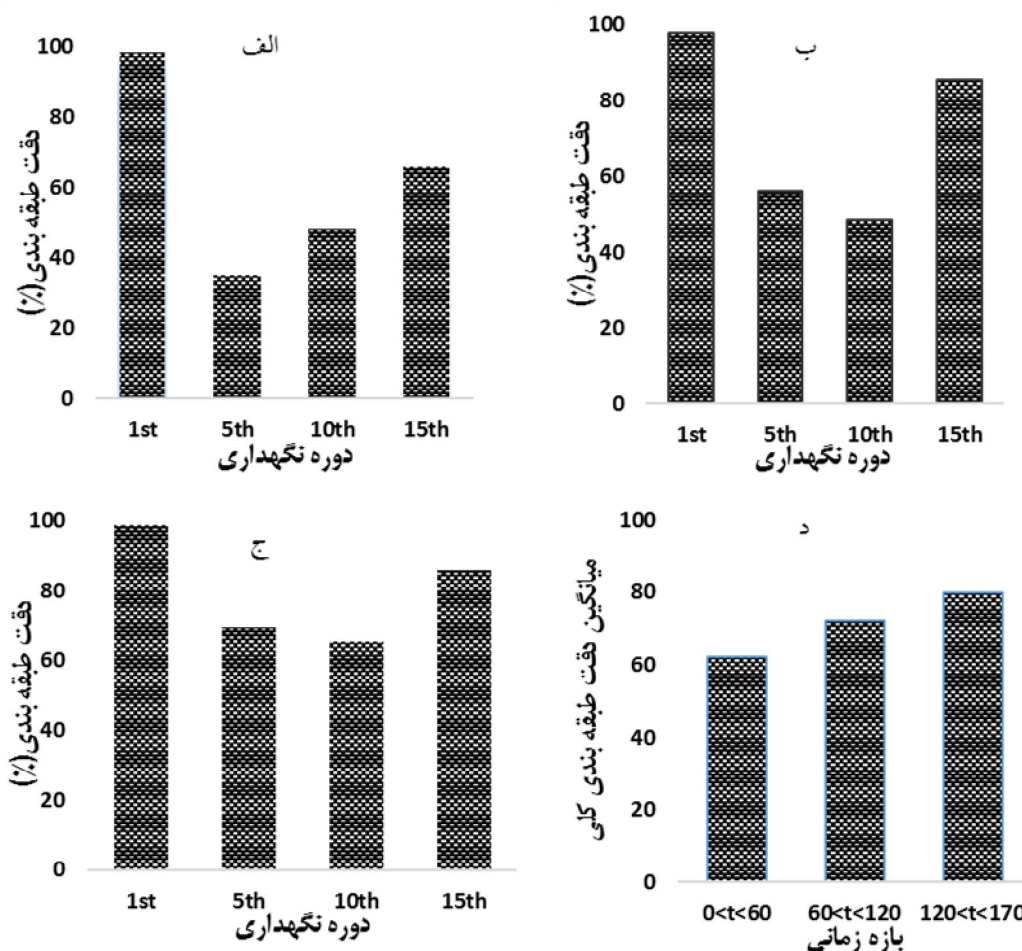
می‌باشد. می‌توان دریافت که سامانه گرم‌نگاری تضاد خوبی را بین اناردانه‌های روز اول، پنجم، دهم و پانزدهم به روش فعال برای شناسایی درجه‌ی ماندگاری نمونه ایجاد می‌کند. بر مبنای مطالعات

جدول ۲- پارامترهای کیفی اناردانه‌ها طی دوره‌ی نگهداری

دوره‌ی نگهداری	محتوی رطوبتی (%)	نیروی وارده (N)	جابجایی شکست (mm)
روز اول	۷۸/۸	۷/۱۳	۰/۸۹
روز پنجم	۶۸	۳/۳۶	۱/۴۱
روز دهم	۶۰/۹۷	۴/۲۴	۱/۴۸
روز پانزدهم	۵۵/۷۹	۷/۸۶	۱/۷۸



شکل ۳- گرادیان دمای چهار دوره‌ی نگهداری اناردانه در فواصل زمانی ۲۰ ثانیه‌ای: الف) روز اول ب) روز پنجم ج) روز دهم د) روز پانزدهم



شکل ۴- دقت طبقه‌بندی انار دانه‌ها در چهار دوره نگهداری با استفاده از آنالیز تفکیک خطی به روش Leave-one-out، الف: ۶۰ ثانیه اول، ب: ۶۰ ثانیه دوم، ج: ۶۰ ثانیه سوم، د: میانگین دقت طبقه‌بندی کل در سه بازه ی زمانی.

## منابع

- Apetrei, C., Apetrei, I. M., Villanueva, S., de Saja, J. A., Gutierrez-Rosales, F., & Rodriguez-Mendez, M. L. 2010. Combination of an e-nose, an e-tongue and an e-eye for the characterisation of olive oils with different degree of bitterness. *Analytica Chimica Acta*, 663, 91-97.
- Baranowski, P., Lipecki, J., Mazurek, W., & Walczak, R. T. 2008. Detection of watercore in 'Gloster' apples using thermography. *Postharvest Biology and Technology*, 47, 358-366.
- Baranowski, P., Mazurek, W., BarbaraWitkowska-Walczak, & ski, C. S. 2009. Detection of early apple bruises using pulsed-phase thermography. *Postharvest Biology and Technology*, 53, 91-100.
- Blasco, J., Cubero, S., Gómez-Sanchís, J., Mira, P., & Moltó, E. 2009. Development of a machine for the automatic sorting of pomegranate (*Punica granatum*) arils based on computer vision. *Journal of Food Engineering*, 90(1), 27-34.
- Donis-González, I. R., Guyer, D. E., Pease, A., & Barthel, F. 2014. Internal characterisation of fresh agricultural products using traditional and ultrafast electron beam X-ray computed tomography imaging. *Biosystems Engineering*, 117, 104-113.
- Du, C.-J., & Sun, D.-W. 2004. Recent developments in the applications of image processing techniques for food quality evaluation. *Trends in Food Science & Technology*, 15, 230-249.
- FAO. 2011. Global food losses and food waste. FAOSTAT Database on agriculture.
- Gobbi, E., Falasconi, M., Torelli, E., & Sberveglieri, E. 2011. Electronic nose predicts high and low fumonisin contamination in maize cultures. *Food Research International*, 44, 992-999.
- Goshtasby, A., & Nikolov, S. 2007. Image fusion: advances in the state of the art. *Information Fusion*, 8(2), 114-118.
- Gowen, A. A., Tiwari, B. K., Cullen, P. J., McDonnell, K., & O'Donnell, C. P. 2010. Applications of thermal imaging



- in food quality and safety assessment. *Trends in Food Science & Technology*, 21 190-200.
- Guohua, H., Yuling, W., Dandan, Y., Wenwen, D., Linshan, Z., & Lvye, W. 2012. Study of peach freshness predictive method based on electronic nose. *Food Control*, 28, 25-32.
- Hellebrand, H. J., Herppich, W. B., Beuche, H., Dammer, K.-H., Linke, M., & Flath, K. 2006. Investigations of plant infections by thermal vision and NIR imaging. *INTERNATIONAL Agrophysics*, 20, 1-10.
- Jha, S. N., Matsuoka, T., & Miyauchi, K. 2002. Surface Gloss and Weight of Eggplant during Storage. *Biosystems Engineering*, 81, 407-412.
- Khazaei, J., Ekrami-Rad, N., Safa, M., & Nosrati, S.-Z. 2008. Effect of air-jet impingement parameters on the extraction of pomegranate arils. *Biosystems Engineering*, 100(2), 214-226 .
- Leemans, V., Magein, H., & Destain, M. F. 2002. On-line fruit grading according to their external quality using machine vision. *Biosystems Engineering*, 83(4), 397-404.
- Luo, X., Jayas, D. S., & Symons, S. J. 1999. Comparison of statistical and neural network methods for classifying cereal grains using machine vision. *Transactions of the ASAE*, 42(2), 413-419.
- Manickavasagan, A., Jayas, D. S., & White, N. D. G. 2008. Thermal imaging to detect infestation by *Cryptolestes ferrugineus* inside wheat kernels. *Journal of Stored Products Research*, 44, 186-192.
- Manickavasagan, A., Jayas, D. S., White, N. D. G., & Paliwal, J. 2010a. Wheat Class Identification Using Thermal Imaging. *Food Bioprocess Technol*, 3, 450-460.
- Mery, D., Lillo, I., Loebel, H., Riffo, V., Soto, A., Cipriano, A., & Aguilera, J. M. 2011. Automated fish bone detection using X-ray imaging. *Journal of Food Engineering*, 105, 485-492.
- Ohali, Y. A. 2011. Computer vision based date fruit grading system: Design and implementation. *Journal of King Saud University –Computer and Information Sciences*, 23, 29-36.
- Ragazzo-Sanchez, J. A., Chalier, R., Chevalier, D., Calderon-Santoyo, M., & Ghommidh, C. 2008. Identification of different alcoholic beverages by electronic nose coupled to GC. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 134, 43-48.
- Shiranita, K., Miyajima, T., & Takiyama, R. 1998. Determination of meat quality by texture analysis. *Pattern Recognition Letters*, 19, 1319-1324.
- Singh, T. K., & Cadwallader, K. R. 2004. 9 - Ways of measuring shelf-life and spoilage. In R. Steele (Ed.), *Understanding and Measuring the Shelf-Life of Food* 165-183: Woodhead Publishing.
- Van Linden, V., Vereycken, R., Bravo, C., Ramon, H., & De Baerdemaeker, J. 2003. Detection technique for tomato bruise damage by thermal imaging. Paper presented at the International Conference: Postharvest Unlimited.
- Veraverbeke, E. A., Verboven, P., Lammertyn, J., Cronje, P., Baerdemaeker, J. D., & Nicolai, B. M. 2006. Thermographic surface quality evaluation of apple. *Journal of Food Engineering*, 77, 162-168.
- Wang, B., Xu, S. Y., & Sun, D. W. 2010. Application of the electronic nose to the identification of different milkflavorings. *Food Research International*, 43, 255-262.
- Yang, B., & Li, S. 2012. Pixel-level image fusion with simultaneous orthogonal matching pursuit. *Information Fusion*, 13(1), 10-19.
- Zhang, B., Huang, W., JiangboLi, Zhao, C., Fan, S., Wu, J., & Liu, C. 2014. Principles, developments and applications of computer vision for external quality inspection of fruits and vegetables: A review. *Food Research International*, 62, 326-343.

## Detection of pomegranate arils and determination of their freshness using thermography

M. R. Golzarian<sup>1\*</sup>, A. Mohammadzadeh<sup>2</sup>, M.H. Abbaspour-Fard<sup>3</sup>

Received: 2014.07.26

Accepted: 2015.01.22

**Introduction:** Every year about 600 million tons of fruits and vegetables are produced in Asia and around 35% out of it is wasted during production, postharvest, processing, distribution and consumption (FAO, 2011). In most cases, the sale rate of agricultural products is affected by their internal quality. Although consumers are unable to detect product's internal quality and freshness while buying, their negative perception can be formed against their next buy if the internal quality of what they bought does not meet their satisfaction (Leemans et al., 2002). For assessing fruits quality factors some destructive and non-destructive tests are performed. The quality factors are categorized into external quality and internal quality factors. With the visual inspection methods, the external features of Bio-materials (e.g. shape, color and texture) can be evaluated (Shiranita et al., 1998) while the internal quality factors, including freshness, cannot be determined from these apparent visual characteristics (Jha et al., 2002). Therefore, the shelf life of agricultural products that are internally defective is less as they perish sooner and the infection expands quicker (Ohali, 2011). Among the common nondestructive methods for assessing internal quality parameters, MRI, X-RAY, Ultrasonic and NMR can be named (Du et al., 2004; Mery et al., 2011). In fruits, vegetables and fruits, the status of freshness is affected by the changes occurred in their physical, chemical and biological structures. These changes and, therefore, freshness, conventionally, is quantified by parameters such as product's mechanical stress, moisture content, temperature and pH. Recently, some advanced technologies such as thermography have been used in quality assessment of agricultural products. Thermography is performed in two types: active and passive. In passive thermography, the heat emitted from the objects is recorded by the camera while in active thermography, which is more common in post-harvest applications, there is an external energy source to produce a thermal contrast between the sample product and the background. The objectives of this research are to use thermography in order to study the effects of time after harvest on the distribution of arils surface temperature and to relate the thermal properties to the freshness of arils.

**Materials and methods:** Freshly harvested pomegranate fruits of Khazar variety were provided from Kashmar gardens. The arils were extracted from 35 randomly selected fruits. The arils of each fruit were kept for 15 days at 5°C. The arils were thermally and visibly imaged and their physical and mechanical properties were measured every 5 days: first day, fifth day, tenth day and fifteenth day after opening the fruit to have variations in freshness. The size of thermal images was 320×240 pixels with the temperature resolution of 0.08°C. The images were taken with the emissivity set at 0.95, which was obtained from masking method (using a high-emissivity patch). This emissivity value was within the range documented for biological products, i.e. 0.93-0.99 (Hellebrand et al., 2006). The thermal images were taken from the arils every 10 seconds for 180 seconds after imposing thermal shock by placing the arils in a freezer compartment at -2°C for 60 seconds. The distance from the thermal camera to the arils was 30cm and the room temperature was 22.5°C. The images were processed and analyzed in Matlab (Mathworks Inc, US) and the thermal features were extracted from the histogram of each thermal images, which included: mean temperature, variance, third moment, smoothness, homogeneity and entropy. Linear Discriminant Analysis (LAD) was employed for classification based on the mentioned features. The validity of input data was examined using Leave-one-out method. Statistical analysis was carried out using stepwise regression method in SPSS ver. 16.

**Results and discussion:** The temperature extraction from the aril regions was done using the fusion of the segmented red/green ratio and the thermal image. The results showed that the temperature gradient with respect to time for one-day was the same as that for the five-day arils. This behavior was probably because the sound and fresh part of these arils was still large enough so that it causes less sensitivity with respect to the temperature

1, 2 and 3- Assistant Professor, MSc Student and Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad Respectly

(\* Corresponding author email: m.golzarian@um.ac.ir)

change. However, the temperature gradient for ten-day and fifteen-day arils was relatively large. The analysis of temperature variations on arils surface showed that the less fresh the arils were, the more thermally sensitive they were with respect to their surroundings. The less fresh arils were cooler than the one-day and five-day arils. This might be due to the extended evaporation from the surface and the larger emissivity of older arils than fresher ones. The larger emissivity in less fresh tissues cause quicker heat penetration inwards or quicker heat loss from inside out, thus, the tissue become cool or hot quicker. Conversely, the fresh tissues have reduced heat transfer. They release heat in a cold environment or becomes warm in a warmer environment at a slow pace rate. The extracted temperature features were used in a Linear Discriminant Analysis (LDA) model for quality assessment and classification of pomegranate arils stored for three 60-second periods. The mean accuracy of classification of arils for three 60-second periods of imaging were obtained to be 62.1%, 72% and 79.8%. The optimum classification results were obtained from the third 60s. In this range, the accuracy of classification of one-day, five-day, ten-day and fifteen-day arils were 98.7%, 69.23%, 65.4% and 89.8%, respectively.

**Conclusion:** Twelve thermal features were extracted from thermal images of arils for classification in terms of freshness. The results confirm that thermography can be used as a non-destructive method for determining the freshness status of pomegranate arils during storage periods.

**Keywords:** Pomegranate aril, Thermal imaging, Freshness level, Shelf-life