

Detection and Classification of Bruises on ‘Red Delicious’ Apples Using Active Thermography

ZAHRA HAJALIOGHLI¹, PARVIZ AHMADI MOGHADDAM^{2*}

1. MSc graduated, Dep. of Mechanical Engineering of Biosystem, faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

2. Assoc. Prof, Dep. of Mechanical Engineering of Biosystem, faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

(Received: June. 4, 2018- Revised: Jan. 16, 2019- Accepted: Feb. 2, 2019)

ABSTRACT

Identifying and sorting healthy agricultural products from damaged products reduces casualties and losses caused by the spread of disease to unhealthy samples. Due to Iran's insignificant contribution to agricultural exports, the use of non-destructive methods, such as thermography in the sorting and grading of the fruit, is necessary. In this research, active thermography method was used to identify the *Red delicious* cultivars of apple. In order to study the temperature variations of apples, used a factorial experiment was conducted in a randomized complete design with three independent variables including bruises, heating temperature and cooling time. The results of variance analysis of surface temperature of healthy and bruise apples showed that the levels of bruises, heating temperature and cooling time on the surface temperature of bruises apples had a significant effect at 1% probability. Statistical and texture features were extracted from thermal images and the artificial neural network method was used to classify two healthy classes and bruised. Neural network accuracy with a hidden layer and 15 neurons was obtained 100%. The results indicate that the difference in temperature of the bruised and sound tissue can be considered as a criterion for the classification of apples. Also, Active thermography is an efficient and high-tech method for detecting apple bruises.

Keywords: Apple, Bruises, Thermography, Artificial Neural Network.

تشخیص و طبقه‌بندی لهدیگی سیب ردلیشز با استفاده از گرمانگاری فعال

زهرا حاج‌علی‌اوغلی^۱، پرویز احمدی‌مقدم^{۲*}

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲. دانشیار، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۱۴ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۰/۲۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۱۱/۱۳)

چکیده

شناسایی و جداسازی محصولات کشاورزی سالم از محصولات آسیب‌دیده موجب کاهش تلفات و ضایعات ناشی از گسترش بیماری نمونه‌های ناسالم می‌شود. به دلیل سهم ناچیز ایران در صادرات محصولات کشاورزی، استفاده از روش‌های غیر مخرب مانند گرمانگاری در مراحل سورت و درجه بندی میوه به دلیل سرعت بالا و هزینه پایین ضروری می‌باشد. در این تحقیق از روش گرمانگاری فعال برای تشخیص و از تکنیک شبکه عصبی مصنوعی برای طبقه‌بندی لهدیگی سیب رقم ردلیشز استفاده شد. برای بررسی تغییرات دمایی سیب‌ها از آزمایش فاکتوریل و طرح کاملاً تصادفی با سه متغیر مستقل درجه لهدیگی، دمای گرم‌کن و مدت‌زمان خنک شدن استفاده شد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که سطوح لهدیگی، دمای گرم‌کن و مدت‌زمان خنک‌شدن بر دمای سطح سیب‌ها دارای تأثیر معنادار در سطح احتمال ۱٪ است. دقت طبقه‌بندی با یک لایه مخفی و ۱۵ نرون، ۱۰۰٪ به دست آمد. نتایج حاصله حاکی از این است که اختلاف دمای قسمت لهدیده و سالم می‌تواند به‌عنوان معیاری جهت طبقه‌بندی سیب‌ها در نظر گرفته شود. همچنین روش گرمانگاری فعال روشی کارا و دارای پتانسیل بالا در تشخیص لهدیگی سیب است.

واژه‌های کلیدی: سیب، لهدیگی، گرمانگاری، شبکه عصبی مصنوعی.

مقدمه

تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های غیر مخرب به علت عدم آسیب رساندن به محصولات، سرعت بالا می‌توانند نقش اساسی در برخط کردن عملیات کنترل کیفی داشته باشند. زمان‌بر بودن، هزینه‌بر بودن و آسیب رساندن به محصول، از جمله معایب روش‌های مخرب بوده که استفاده از آن‌ها را محدود به کارهای آزمایشگاهی کرده است. از رایج‌ترین روش‌های غیر مخرب می‌توان به تصویربرداری طیف‌سنجی، تصویربرداری پس پراکنش لیزر، تصویربرداری بر مبنای مقاومت مغناطیسی هسته^۱، اشعه ایکس^۲، ماورا صوت^۳ و بیوسنسورها اشاره کرد (Du et al., 2004; Mery et al., 2011).

امروزه جداسازی سیب‌ها بر اساس رنگ و اندازه در کشورهای مختلف به‌طور خودکار انجام می‌شود (leemans et al., 2004). اما تشخیص عیوب و درجه بندی آن‌ها هم‌اکنون به کمک نیروی انسانی متخصص انجام می‌شود. روش‌های تصویربرداری چندطیفی و ابرطیفی بیشتر برای تشخیص عیوب درونی و برخی از عیوب خاص مناسب هستند. از طرفی پردازش تصاویر در چندین طیف زمان‌بر و پیاده‌سازی چنین سیستم‌هایی پیچیده و پرهزینه است. روش دیگر استفاده از تصویربرداری رنگی است

ایران در سال ۲۰۱۶ میلادی با تولید ۲/۷ میلیون تن میوه سیب توانست جایگاه ششم را در بین کشورهای تولیدکننده سیب در جهان به خود اختصاص دهد (FAO, 2016). متأسفانه سهم ایران از صادرات جهانی این محصول به علت عدم وجود استاندارد و تکنولوژی پس از برداشت، بسیار ناچیز است (United Nation, 2007). مسئله بازاریابی یکی از مسائل مهم در مورد محصولات کشاورزی بالأخص میوه‌ها و سبزیجات بوده و درخواست مشتری جهت استفاده از محصولات کشاورزی باکیفیت بالاتر در دهه‌های اخیر رشد بسیار زیادی کرده و روز به روز در حال افزایش است (Zeebroeck et al., 2006). یکی از ویژگی‌های مهم محصولات کشاورزی که در ارتباط مستقیم باکیفیت محصول می‌باشد، لهدیگی است. لهدیگی به معنای آسیب دیدن بافت میوه توسط یک نیروی خارجی است که سبب قرار گرفتن سیب‌های لهدیده در درجات کیفی پایین‌تر به هنگام بازرسی، می‌شود (Xing and Baerdamaker, 2005).

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری شاخص‌های کیفی میوه توسعه پیدا کرده که خود به دو دسته مخرب و غیر مخرب

* نویسنده مسئول: parvizmhd@yahoo.com

1. Magnetic resonance imaging (MRI)
2. X-RAY
3. Ultrasonic

ویژگی‌های میوه سیب تولیدی در کشور، شناخت نوع و ویژگی و میزان کارایی سامانه‌های بسته‌بندی مرسوم، محدوده‌های آسیب‌پذیری میوه‌ها، مدیریت صحیح بعد از برداشت و توسعه فنون مناسب جهت بسته‌بندی، حمل‌ونقل و نگهداری است. هدف این تحقیق بررسی توانایی روش گرمانگاری فعال به‌منظور شناسایی لهیدگی سیب به‌عنوان یکی از آسیب‌های مکانیکی که علاوه بر تغییر در سطح میوه سبب تخریب بافت درونی آن می‌شود، می‌باشد.

مواد و روش‌ها

تهیه نمونه‌ها

برداشت سیب رقم ردلشیز از یکی از باغ‌های شهرستان ارومیه انجام شد. سیب‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شدند که فاقد هرگونه آسیب ظاهری بودند. پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، سیب‌ها تا شروع آزمایش‌ها (به مدت ۱ الی ۳ روز) در داخل یخچال (4°C) نگهداری شد.

اندازه‌گیری خواص مکانیکی

با توجه به تهیه نمونه‌ها از شرایط یکسان، تعداد ۲۰ نمونه سیب به منظور تعیین پارامتر سفتی مورد استفاده قرار گرفت که نماینده کل نمونه‌ها باشد. به‌منظور تعیین شاخص سفتی نمونه‌ها از دستگاه آنالیز بافت مدل TA.XT plus ساخت کمپانی استیل میکروسیستم انگلستان با پروبی از جنس استیل به قطر $15/3$ میلی‌متر استفاده گردید. عملیات بارگذاری نمونه سیب با سرعت 20 mm/min صورت گرفت. عملیات باربرداری بلافاصله پس از آن با همان سرعت بارگذاری انجام شد. پس از اتمام کار، نمودار نیرو-جابجایی مربوطه در کامپیوتر ذخیره شد و پارامتر سفتی استخراج شد (Barreiro *et al.*, 1998).

اندازه‌گیری شاخص‌های شیمیایی

الف) اندازه‌گیری محتوای مواد جامد محلول

از شاخص‌های مهم وضعیت رسیدگی سیب، درصد کل مواد محلول جامد SSC^1 می‌باشد. این شاخص برای ۲۰ نمونه سالم از کل نمونه‌ها توسط دستگاه رفرکتومتر (انکسار سنج) اندازه‌گیری گردید و SSC نمونه بر اساس شاخص بریکس به‌صورت درصد (%) گزارش شد. در تحقیق حاضر، از یک دستگاه رفرکتومتر دستی مدل SBR-90A استفاده شد. پس از کالیبره نمودن دستگاه با آب مقطر، مقداری از عصاره نمونه روی منشور دستگاه رفرکتومتر قرار می‌گرفت. نهایتاً دستگاه را جلوی نور قرار داده و عدد مربوطه از روی ستون مدرج قرائت می‌شد.

که از مشکلات مهم آن در تشخیص عیوب سیب، تمیز عیوب از دمگاه و کاسبرگ است و همچنین ایجاد خطا در سیب‌های با رنگ پوست تیره است. در حال حاضر گرمانگاری به‌عنوان یک شیوه‌ی نسبتاً جدید با هزینه و پیچیدگی به‌مراتب کمتر در حال توسعه است (Veraverbekw *et al.*, 2006). گرمانگاری یک فناوری مفید دوبعدی غیر تماسی برای اندازه‌گیری دمای سطح موادی است که نیازمند ارزیابی غیرمخربند. غیر تماسی بودن، غیر مخرب بودن و ارائه نقشه‌های گرمایی هم‌زمان با تغییر در دمای اشیاء از ویژگی‌های مهم این تصاویر می‌باشد. Jamil *et al.* (2014) با کمک فناوری گرمانگاری فعال توانستند پوسته برنج را از برنج مشخص کنند. ایجاد دمای گرمایشی و سرمایشی برای تمایز بین پوسته بذر و دانه برنج با توجه به انتقال حرارت انجام شد.

Stockton, G.R and Lima *et al.* (2015) به امکان تصویربرداری حرارتی در گیاه پایا برای ارزیابی وضعیت فیزیولوژیکی این محصول در روش‌های آبیاری مختلف پرداختند. ارتباط معنی‌دار بین دمای برگ و متغیرهای فیزیولوژیکی و همچنین بین اختلاف دمای برگ- هوا و تبادل گاز مشاهده شد. Hellebrand *et al.* (2000) نشان داد که آسیب‌های مکانیکی سبب افزایش موضعی دما می‌شود که قابل تشخیص است. همچنین اشاره کردند که تغییرات دمایی در این نواحی کمتر از ۱ درجه سلسیوس می‌باشد. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که درجه رسیدگی محصول با تصاویر گرمایی قابل تشخیص است. در تحقیقی، پژوهشگران جهت تعیین کیفیت سطحی دو رقم سیب (Elshof and Jonagored) از روش گرمانگاری استفاده کردند. نتایج نشان داد که تفاوت دمایی در میزان سرد شدن دو رقم سیب وجود دارد که ناشی از تفاوت در ساختار این دو رقم می‌باشد و رقم (Elshof) سریع‌تر از رقم دیگر سرد می‌شود (Veraverbeke *et al.*, 2003). دوستی و همکاران (۲۰۱۶)، در پژوهشی با استفاده از پردازش تصاویر گرمایی و استخراج دما از سطح میوه سیب به تعیین عمق لهیدگی در ناحیه لهیده شده سیب پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل رگرسیون خطی حاصل شده با قابلیت اطمینان ۹۵٪ قادر به پیش‌بینی عمق لهیدگی می‌باشد. دوستی و همکاران (۱۳۹۴)، با استفاده از پردازش تصاویر مرئی و گرمایی به بررسی تغییرات رنگ و دما در بافت لهیده سیب در طول زمان پرداختند، نتایج این تحقیق نشان داد که این تغییرات با استفاده از پردازش تصاویر قابل ثبت و تفسیر است. اختلاف دمایی بین بافت سالم و لهیده بین $0/5-1$ متغیر است.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که به‌منظور بسترسازی جهت افزایش صادرات این محصول، نیاز به تحقیق در زمینه شناخت

تغییرات دمایی در محیط باید به حداقل برسد، بنابراین بهترین حالت تصویربرداری گرمایی استفاده از یک محیط عایق است. برای این منظور سامانه‌ای شامل دوربین حرارتی، جعبه تاریک، دماسنج، رایانه، کابل‌های ارتباطی، فن، گرم‌کن و بستر عایق ساخته شد. فاصله بهینه دوربین و نمونه ۴۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که بصورت عمودی در بالای جعبه نصب شده است (Chelladurai et al., 2010). در شکل ۱ طرح‌واره بستر آزمایشگاهی و سامانه گرمانگاری نشان داده شده است. جعبه تاریک محفظه‌ای چوبی عایق‌کاری شده، که دمای داخل آن قابل کنترل بود و اگر دما از ۲۵ درجه سلسیوس افزایش می‌یافت فن به کار افتاده و دمای داخل جعبه را به ۲۵ (دمای محیط) می‌رساند.

از دوربین گرمانگاری فروسرخ NEC، مدل G120 ساخت شرکت NEC Avio ژاپن، برای تهیه تصاویر گرمایی سیب‌ها استفاده شد. دوربین گرمانگاری مورد نظر دارای تفکیک‌پذیری ۳۲۰×۲۴۰ پیکسل، توانایی دریافت گستره طیفی ۸ تا ۱۴ μm، حساسیت گرمایی ۰/۰۴°C در دمای ۳۰°C و تفکیک‌پذیری طیفی (میدان دید) آن ۷۸/۱ mrad می‌باشد. یکی از پارامترهایی که برای اندازه‌گیری دقیق دما لازم است ضریب گسیلندگی می‌باشد به این منظور ابتدا ضریب گسیلندگی سیب‌های تهیه شده اندازه گرفته شد.

جدول ۱- سطوح مختلف لهیدگی سیب (ASME standard)

| توضیحات | قطر لهیدگی (cm) | عمق لهیدگی (cm) |
|--------------|-----------------|-----------------|
| سالم | - | - |
| لهیده سطح یک | ۱/۵۸ | ۰/۳ |
| لهیده سطح دو | ۲/۲۲ | ۰/۴ |
| لهیده سطح سه | ۳/۴ | ۰/۹ |

ب) اندازه‌گیری محتوای رطوبتی

به‌منظور اندازه‌گیری محتوای رطوبتی از روش خشک‌کردن در گرم‌کن استفاده شد. ابتدا هر نمونه به دو قسمت تقسیم شد و سپس با استفاده از یک ترازوی دیجیتالی مدل SARTORIUS GE1302 (با دقت ۰/۰۱ گرم) وزن شدند، سپس در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس نگهداری شدند تا زمانی که به وزن ثابت رسیدند (Qing et al., 2007). نمونه‌ها پس از خشک شدن دوباره وزن شدند و در نهایت محتوی رطوبتی آن‌ها با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد.

$$MC(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100 \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن M_1 جرم اولیه نمونه برحسب گرم، M_2 جرم نمونه بعد از خشک شدن برحسب گرم و MC درصد محتوای رطوبت می‌باشد.

ایجاد لهیدگی

برای انجام آزمایشات تعداد ۸۰ نمونه سیب در چهار سطح (سیب سالم (۲۰نمونه)، لهیدگی سطح یک (۲۰نمونه)، لهیدگی سطح دو (۲۰نمونه)، لهیدگی سطح سه (۲۰نمونه)) مورد ارزیابی قرار گرفت که متفاوت از نمونه‌هایی بوده که برای تعیین خواص مکانیکی و شیمیایی بکار برده شده است (جدول ۱). برای ایجاد لهیدگی از روش ضربه زن پاندولی استفاده شد. یک ضربه زن پاندولی متشکل از یک بازوی بلند ۰/۵ متری که در انتهای آن یک صفحه صاف آلومینیومی به ابعاد ۶×۶ سانتی‌متری نصب شده بود ساخته شد (Juan Xing, 2005). با استفاده از روش آزمون‌وخطا برای ایجاد لهیدگی سطح ۱، ۲ و ۳ با توجه به جدول ۱ زوایای بهینه با رها کردن پاندول به ترتیب ۲۵، ۴۵، ۶۵ درجه تعیین شد.

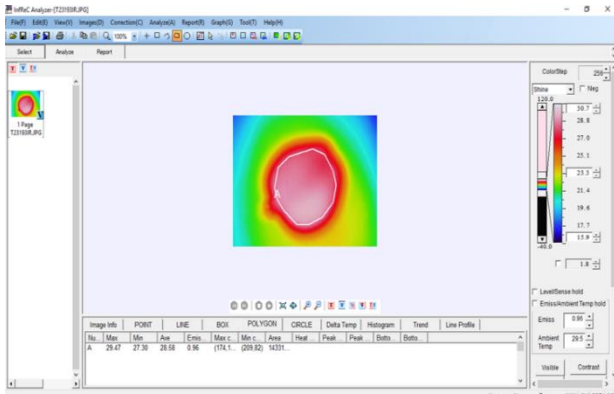
آماده‌سازی مجموعه تصویربرداری حرارتی

جهت کاهش خطاهای ناشی از محیط در هنگام تصویربرداری،



شکل ۱- مجموعه تهیه تصاویر حرارتی

شد. هدف بررسی معنادار بودن اثر لهیدگی بر دمای سطح سیبها بود و همچنین به دست آوردن تیماری که بیشترین اختلاف دمایی را دارد. برای این منظور در این تحقیق از آزمایش فاکتوریل با سه عامل میزان لهیدگی در ۴ سطح، دمای گرم کن در ۲ سطح و زمان خنک شدن در ۴ سطح با ۵ تکرار استفاده شد و تحلیلها با استفاده از نرم افزار SAS انجام شد.



شکل ۲- تعیین دمای سطح سیب توسط نرم افزار InfReC

در ادامه تصاویر گرمایی وارد محیط نرم افزار متلب شده و عملیات پیش پردازش شامل بخش بندی تصاویر به منظور یافتن ناحیه سیب و جداسازی مولفه های اصلی تصویر شامل سطوح قرمز، آبی، سبز و همچنین تبدیل تصویر رنگی به سطح خاکستری و ماتریس هم رویدادی بر روی تصاویر صورت گرفت. از آنجایی که وارد کردن یک تصویر به عنوان داده های ورودی به شبکه عصبی کاری دشوار و غیرممکن است، از این رو برای جداسازی کلاس های تصویر از یک سری عملیات تحت نام استخراج ویژگی به منظور کاهش حجم اطلاعات ورودی به شبکه عصبی مصنوعی استفاده می شود این ویژگی ها توسط محققان زیادی استفاده شده است (Manickavasagan *et al.*, 2003; Baranowski *et al.*, 2008; Van linden *et al.*, 2008).

از سطوح قرمز، آبی، سبز و خاکستری تصاویر ویژگی های آماری (مقدار میانگین، حداکثر، حداقل، مجموع، مربع مجموع، انحراف استاندارد، مربع انحراف استاندارد، ضریب تغییرات، میانه، مد، آنتروپی، انرژی، کوواریانس، چولگی، کشیدگی شدت پیکسل - های تصویر گرمایی) و از ماتریس هم وقوعی برای استخراج ویژگی های بافتی تصویر در حوزه مکان است. برای محاسبه ماتریس هم وقوعی باید احتمال قرار گرفتن جفت پیکسل هایی که با یک ساختار مشخص در کنار یکدیگرند، محاسبه کرد. این ساختار شامل فاصله d و زاویه قرارگیری θ بین

تحصیل تصاویر حرارتی

در ابتدا به منظور تهیه تصاویر حرارتی از روش گرمانگاری غیر فعال استفاده گردید. نتایج تجزیه واریانس دمای سطح سیب های سالم و لهیده در این روش نشان داد که لهیدگی بر دمای سطح سیب ها اثر معناداری ندارد. در روش گرمانگاری غیر فعال چون نمونه ها در دمای محیط قرار دارند لذا دمای آنها با دمای محیط هم دما شده است و هیچ اختلاف دمایی بین نمونه های لهیده و سالم مشاهده نشد. لذا در ادامه تحقیق از روش گرمانگاری فعال استفاده شد.

برای اینکه دمای گرمانگاری فعال و همچنین زمان مناسب عکس برداری از نمونه بعد از خروج از گرم کن تعیین گردد، ابتدا دو دمای ابتدا ۶۰ و ۹۰ درجه سلسیوس با توجه به منابع موجود و زمان های ۱۰، ۲۵، ۴۰ و ۷۰ ثانیه به عنوان پیش فرض در نظر گرفته شد (دوستی و همکاران ۱۳۹۴). نمونه ها به ترتیب شماره گذاری گردید و سپس هر یک از نمونه ها برای رسیدن به دمای مورد نظر در گرم کن (مدل DZF-6020) قرار گرفتند. به منظور کاهش اتلاف گرما و ایجاد خطا نمونه ها با استفاده از دستکش حرارتی هم دما با آن از داخل گرم کن به محفظه تصویربرداری انتقال داده شد و از لحظه قرار گرفتن در محفظه به ترتیب با فواصل زمانی ۱۰، ۲۵، ۴۰ و ۷۰ ثانیه، تصویربرداری از سطح نمونه ها صورت گرفت (جدول ۲).

جدول ۱- تیمارهای مختلف برای تشخیص لهیدگی در سیب

| نام تیمار | دمای گرم کن (°C) | مدت زمان خنک شدن (s) |
|-----------|------------------|----------------------|
| T1 | ۹۰ | ۱۰ |
| T2 | ۹۰ | ۲۵ |
| T3 | ۹۰ | ۴۰ |
| T4 | ۹۰ | ۷۰ |
| T5 | ۶۰ | ۱۰ |
| T6 | ۶۰ | ۲۵ |
| T7 | ۶۰ | ۴۰ |
| T8 | ۶۰ | ۷۰ |

پردازش تصاویر گرمایی

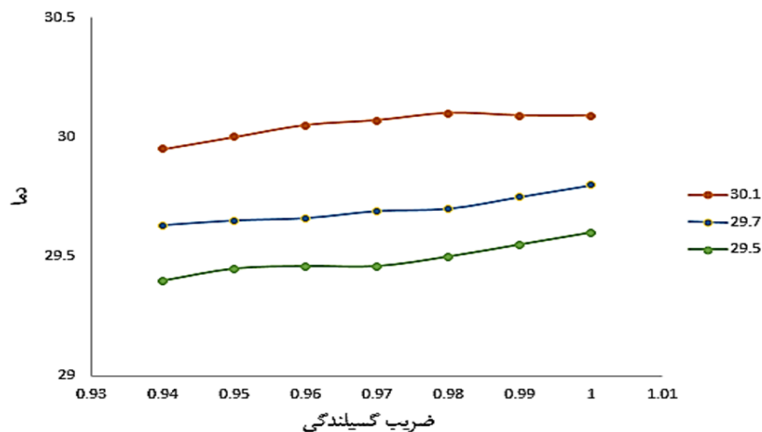
پردازش اولیه تصاویر برای تعیین دمای سطح سیبها در نرم افزار InfReC (Analyzer NS9500 Standard) انجام گردید (شکل ۲). این نرم افزار رابط بین دوربین و رایانه است. ابتدا در محیط نرم افزار InfReC میانگین دمای سطح تمامی سیبها به دست آمد. سپس اختلاف دمای هر یک از سطوح لهیدگی از تیمار شاهد محاسبه

درصد کل SSC، توسط دستگاه فرکتومتر اندازه‌گیری شد و میانگین محتوای مواد محلول جامد نمونه‌ها ۱۷/۹۲ درصد گزارش شد. همچنین برای اندازه‌گیری محتوی رطوبتی، پس از خارج کردن نمونه‌ها از گرم‌کن و اندازه‌گیری وزن آن‌ها، وزن به دست آمده از وزن اولیه کم شد و طبق رابطه ۱ محتوی رطوبت آن‌ها محاسبه گردید. از مقادیر به دست آمده میانگین گرفته شد و در نهایت درصد رطوبت سیب‌ها برابر ۸۴/۶٪ تعیین شد

نتایج حاصل از تعیین گسیلندگی نمونه‌ها

دوربین‌های گرمایی دمای جسم را با تنظیم گسیلندگی آن به یک تصویر قابل‌مشاهده تغییر می‌دهند. این تنظیمات دوربین در خروجی نهایی دمای قابل‌مشاهده جسم تأثیرگذار است؛ بنابراین قبل از انجام تصویربرداری گرمایی لازم است ابتدا مقدار گسیلندگی تنظیم شود.

برای تعیین گسیلندگی نمونه‌ها، دمای سه نقطه از سیب‌ها توسط دماسنج تماسی اندازه‌گیری شد و با تغییرات گسیلندگی نمونه دمای این سه نقطه در نرم‌افزار InfReC قرائت شد. دمای قرائت شده نمونه در نرم‌افزار InfReC در مقابل گسیلندگی در نمودار شکل ۳ رسم شده است. دماسنج تماسی دمای سه نقطه نمونه را حدود ۲۹/۵ °C، ۲۹/۷ °C، ۳۰/۱ °C نشان داد. با تغییر ضریب گسیلندگی و با کمی دقت در آن مشاهده می‌شود که در جایی که گسیلندگی برابر ۰/۹۶ تا ۰/۹۸ می‌باشد دمای قرائت شده توسط دوربین گرمانگاری دارای نزدیک‌ترین مقدار به دماهای نشان داده شده توسط دماسنج تماسی است. زمانی که دمای قرائت شده توسط دوربین گرمانگاری دارای نزدیک‌ترین مقدار به دماهای نشان داده شده توسط دماسنج تماسی است ضریب گسیلندگی به دست می‌آید. لذا بر اساس نتایج حاصل از این نمودار، میانگین گسیلندگی نمونه‌های سیب 0.97 ± 0.01 به دست آمد.



شکل ۳- نمودار تغییرات دما در مقابل گسیلندگی سیب (محدوده گسیلندگی ۰/۹۴-۱)

جفت پیکسل‌ها است. بر این اساس ماتریس هم وقوعی با معادله (۲) تشکیل شد (Teimouri et al., 2015).

در این رابطه c ماتریس هم وقوعی، i و j اندازه تصویر Δx, Δy و پارامتر آفست و m و n برابر تعداد سطوح خاکستری هستند.

طبقه‌بندی

برای طبقه‌بندی سیب‌های لهیده و سالم از شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. شبکه‌های عصبی مصنوعی با پردازش روی داده‌های تجربی، دانش یا قانون نهفته در ورای داده‌ها را به ساختار شبکه منتقل می‌کنند و عملاً برای اطلاعات ورودی ناقص و توأم با دقت کم، ارزشمند است.

مرحله‌ی 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). برای ارزیابی روش ارائه شده تشخیص لهیدگی سیب از ماتریس اغتشاش استفاده شد. ماتریس اغتشاش حاوی اطلاعات (کلاس‌های) مطلوب یا واقعی و اطلاعات تخمین زده توسط طبقه‌بند است.

نتایج و بحث

نتایج آزمایش‌های اولیه

پس از قرار گرفتن نمونه‌های سیب زیر دستگاه آنالیز بافت، نمودار نیرو (N) - جابجایی (mm) برای ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی استخراج شد. شیب منحنی نیرو-جابجایی در فاصله نیرویی یک سوم تا دو سوم ماکزیمم نیرو به‌عنوان سفتی در نظر گرفته شد (Barreiro et al., 1998). مقدار میانگین سفتی برای نمونه‌ها ۲۱/۰۶ نیوتن بر میلی‌متر به دست آمد.

فاکتورهای لهیدگی، دمای گرم‌کن و مدت‌زمان خنک شدن در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج نشان داد که هر سه فاکتور میزان لهیدگی سیب، دمای گرم‌کن و مدت‌زمان خنک شدن در تمامی سطوح لهیدگی دارای تأثیر معنادار بر دمای سطح سیب‌ها بوده‌اند. همچنین اثرات متقابل دوگانه تیمارهای میزان لهیدگی سیب×زمان خنک شدن، میزان لهیدگی سیب×دما، دما×زمان خنک شدن و اثرات سه‌گانه میزان لهیدگی سیب×دما×زمان خنک شدن تأثیر معنی‌دار بر دمای سطح سیب‌ها دارد.

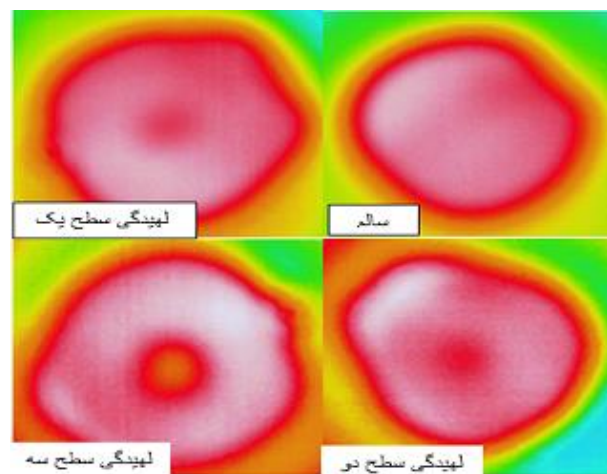
نتایج ارائه شده در جدول ۳ نشان داد که با ایجاد لهیدگی بر روی سیب‌ها تغییراتی که در نرخ سرد و گرم شدن سیب‌ها ایجاد شده است ناشی از تغییر در ضریب نفوذ گرمایی سیب‌ها می‌باشد. به عبارتی به هنگام ضربه دیدن بافت سیب به علت نیروی فشاری وارد شده به دیواره سلولی سبب پاره شدن این بافت و انتقال مایع درون‌سلولی به بین سلول‌ها می‌گردد و باعث افزایش در ظرفیت گرمایی ویژه می‌گردد ولی این افزایش سبب تغییر در نفوذ گرمایی نمی‌شود و به‌عنوان یک عامل که اثر معنی‌داری بر روی نفوذ حرارتی داشته باشد مورد بررسی قرار نمی‌گیرد. از طرفی نیروی ضربه‌ای سبب متراکم شدن بافت شده و چگالی بافت افزایش می‌یابد. مطابق با رابطه ۳ با افزایش در مقدار این دو فاکتور ضریب نفوذ گرمایی نیز دچار تغییر می‌گردد. با توجه به نتایج محققین ضریب هدایت حرارتی (K) نیز بر روی ضریب نفوذ گرمایی (α) تأثیرگذار بوده و اثر آن بیش‌تر از دو فاکتور چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه است و افزایش آن سبب افزایش نفوذ حرارتی می‌گردد.

$$\alpha = \frac{K}{\rho C_p} \quad (\text{رابطه ۳})$$

α ضریب نفوذ حرارتی، K ضریب هدایت حرارتی، ρ چگالی، C_p ظرفیت گرمایی ویژه.

در تحقیقی مقدار گسیلندگی برای سیب ۰/۹۴-۰/۹۷ به دست آمده در تحقیق حاضر، مطابقت بالایی با ضریب گسیلندگی گزارش شده توسط Hellebrand *et al* (2006) دارد.

نتایج حاصل از بررسی تغییرات دمای سطح تیمارهای مختلف شکل ۴ تصاویر گرمایی سطوح مختلف لهیدگی (سالم، لهیدگی سطح یک، سطح دو و سطح سه) را نشان می‌دهد. فاکتور دمای سطح تیمارهای مختلف از تصاویر گرمایی با استفاده از نرم‌افزار InfReC (Analyzer NS9500 Standard) استخراج گردید و نتایج زیر حاصل شده است.



شکل ۴- تصاویر گرمایی سطوح مختلف لهیدگی

تفاوت دمایی بافت لهیده و سالم برای لهیدگی سطح یک، لهیدگی سطح دو، لهیدگی سطح سه اندازه‌گیری شد و میانگین این تفاوت‌ها به ترتیب برابر با ۰/۹، ۱/۵ و ۲/۷ درجه سلسیوس برای تیمار ۶۰ درجه گرم‌کن و ۱/۱، ۱/۹ و ۳/۳ برای تیمار ۹۰ درجه گرم‌کن به دست آمد.

نتایج تجزیه واریانس دمای سطح نمونه‌ها تحت تأثیر

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) دمای سطح سیب‌ها
A=میزان لهیدگی سیب، B=دمای گرم‌کن، C=زمان خنک شدن

| منبع تغییرات | درجه آزادی | میانگین مربعات | F-Value | Prob |
|--------------|------------|----------------|---------|---------|
| A | ۳ | ۱۵/۶۲ | ۳۳۶۹/۶۶ | <۰/۰۰۰۱ |
| B | ۱ | ۲/۰۳ | ۴۳۸/۱۹ | <۰/۰۰۰۱ |
| C | ۳ | ۱۱/۳۳ | ۲۴۴۴/۵۰ | <۰/۰۰۰۱ |
| A*B | ۲ | ۰/۵۵ | ۱۱۹/۵۱ | <۰/۰۰۰۱ |
| A*C | ۶ | ۱/۱۵ | ۲۴۸/۳۶ | <۰/۰۰۰۱ |
| B*C | ۳ | ۰/۱۸ | ۳۹/۰۰ | <۰/۰۰۰۱ |
| A*B*C | ۶ | ۰/۰۴۹ | ۱۰/۶۷ | <۰/۰۰۰۱ |
| خطا | ۹۶ | ۰/۰۱ | | |
| کل | ۱۱۹ | | | |

$$CV = ۵/۶۱ \text{ و } R^2 = ۰/۹۹$$

بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان داد که سطوح لهیدگی سیب، دمای گرم کن و مدت زمان خنک شدن بر دمای سطح سیبها دارای تأثیر معنادار در سطح احتمال ۱٪ است.

هر چه اختلاف دمای سطح سیبهای سالم و سطوح مختلف لهیدگی بیش تر باشد تشخیص و طبقه بندی سیبها با دقت بیشتری انجام می شود. از طرفی نتایج جدول ۳ نشان داد که سطوح مختلف لهیدگی بر دمای سطح سیب در تیمارهای مختلف معنادار است. با توجه به مطالب فوق انتخاب تیماری که بیشترین اختلاف دما در سطوح مختلف لهیدگی را ایجاد کند لازم است چراکه کارهای آزمایشگاهی، داده برداری و حجم محاسبات لازم برای مراحل بعدی داده برداری به یک هشتم کاهش پیدا می کند. از طرفی انتخاب تیمار با اختلاف دمایی بیش تر سبب افزایش دقت طبقه بندی خواهد شد.

برای دستیابی به بیشترین اختلاف دما بین سطوح مختلف لهیدگی به منظور انتخاب تیمار برتر، مقایسه میانگین اثر متقابل دمای گرم کن × زمان خنک شدن بر اساس آزمون توکی انجام شد و نمودار مقایسه میانگینها در دو دمای گرم کن ۶۰ و ۹۰ درجه سلسیوس شکل ۵ به دست آمد. این نمودار نشان دهنده تغییرات اختلاف دمای سطح نمونهها به عنوان تابعی از دمای گرم کن در زمانهای مختلف خنک شدن (۱۰، ۲۵، ۴۰، ۷۰ ثانیه) می باشد.

بنا بر نتایج به دست آمده در شکل ۵ و جدول ۴ بهترین روش برای داشتن بیشترین اختلاف دما بین سطوح مختلف لهیدگی استفاده از دمای ۹۰ درجه سلسیوس برای گرم کن و مدت زمان خنک شدن نمونهها به مدت ۱۰ ثانیه است. به این معنی که انتخاب این تیمارها در تشخیص سیبهای لهیده در سطوح مختلف اثر گذارتر خواهد بود.

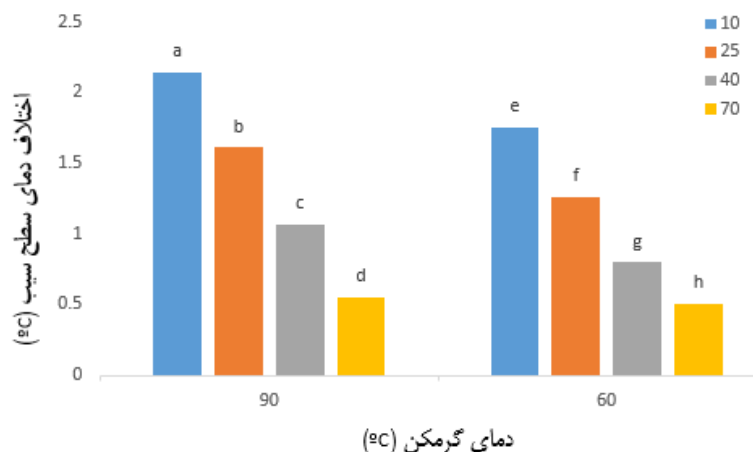
بنابراین عامل تأثیرگذار در تغییرات دمایی بافت سالم و لهیده ضریب نفوذ گرمایی می باشد با توجه به اینکه ضریب هدایت حرارتی بافت لهیده بیش تر از بافت سالم است، نفوذ حرارتی بافت لهیده نیز بیش تر از بافت سالم است. بزرگ تر بودن ضریب هدایت حرارتی به معنای انتقال بیش تر حرارت از سطح بیرونی بافت به سطح درونی آن می باشد.

هنگامی که دما در بافت لهیده تغییر می کند میزان گسیل گرما از آن نیز دچار تغییر می شود. دوربین حرارتی با دریافت و ثبت امواج گسیل شده در دامنه فرسرخ از سطح سیب یک نقشه گرمایی از آن ارائه می دهد. مطابق با قانون استفان بولتزمن، شدت گرمایی ساطع شده از واحد سطح با توان اول ضریب گسیلندگی و با توان چهارم دمای سطح متناسب است (رابطه ۴). نتایج پژوهش واریث و همکاران نشان داد که اختلاف معنی داری بین ضریب گسیلندگی بافت سالم و لهیده سبب وجود ندارد و بنابراین اختلاف دمای ثبت شده در نقشه های گرمایی برای بافت سالم و لهیده به علت وجود دمای سطح متفاوت است (Varith et al., 2003). رابطه ۴ شدت گرمای تابشی ساطع شده از سطح که متناسب با دما و ضریب گسیلندگی می باشد را نشان می دهد.

$$w = \delta \varepsilon T^4$$

w ، شدت گرمای تابشی ساطع شده از هر واحد سطح (W/m^2) ، ثابت بولتزمن $(\delta, 5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4)$ ، ضریب گسیلندگی $(\varepsilon, W/m^2 \cdot k^4)$ و T دمای سطح (k).

همان طور که بیان شد ایجاد لهیدگی در سطح سیب اثر معناداری بر دمای سطح سیبها در روش گرمانگاری فعال دارد. در این روش از نمونهها در شرایط دو سطح دمای ۶۰ و ۹۰ درجه سلسیوس و ۴ سطح زمان خنک شدن ۱۰، ۲۵، ۴۰ و ۷۰ ثانیه تصویربرداری حرارتی به عمل آمد و میانگین دمای سطح آنها



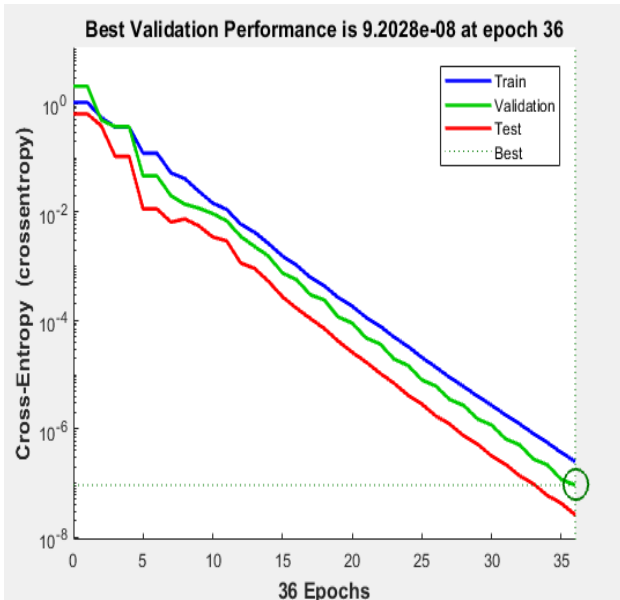
شکل ۵- تغییرات اختلاف دمای سطح نمونهها به عنوان تابعی از دمای گرم کن در زمانهای مختلف خنک شدن

جدول ۴-۰۴- مقایسه میانگین تمامی تیمارهای آزمایش تحت عوامل سطوح لهیدگی، دمای گرم کن، زمان خنک شدن

| لهیدگی | | | زمان خنک شدن | دمای گرمکن |
|--------|--------|--------|--------------|------------|
| سطح سه | سطح دو | سطح یک | | |
| ۲/۷۸b | ۱/۵۴e | ۰/۹۴hi | ۱۰ | ۶۰ |
| ۱/۹۰d | ۱/۰۹gh | ۰/۸۰zj | ۲۵ | |
| ۱/۱۱g | ۰/۸۰zj | ۰/۵۰k | ۴۰ | |
| ۰/۷۵z | ۰/۴۸k | ۰/۳۰l | ۷۰ | ۹۰ |
| ۳/۳۸a | ۱/۹۲d | ۱/۱۲g | ۱۰ | |
| ۲/۵۹c | ۱/۳۳f | ۰/۹۲i | ۲۵ | |
| ۱/۸۰d | ۰/۸۶zj | ۰/۵۴k | ۴۰ | |
| ۰/۸۷zj | ۰/۴۹k | ۰/۳۰l | ۷۰ | |

*حروف مشترک اختلاف معنی‌دار آماری در سطح ۵٪ ندارند.

لهیده



شکل ۷- نمودار عملکرد طبقه بند بر اساس خطای آنتروپی - مقاطع

مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق با تحقیقات مشابه در تشخیص و طبقه بندی لهیدگی در محصولات کشاورزی نشان داد که روش ارائه شده در این تحقیق روشی قابل اعتماد و موفق در تشخیص لهیدگی در سیب است. روش تصویربرداری حرارتی و شبکه عصبی ارائه شده در این تحقیق یکی از روش‌های توانمند در تشخیص سیب‌های سالم از لهیده است. همان‌طور که ذکر شد این روش می‌تواند با دقت ۱۰۰٪ سیب‌های لهیده را از سالم تشخیص دهد.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که تصویر برداری حرارتی ابزاری مناسب برای ارزیابی و شناسایی بافت سالم و لهیده سیب

نتایج حاصل از طبقه بندی سیب در دو کلاس لهیده و سالم بر اساس تصاویر گرمایی

شبکه دارای یک لایه مخفی با تعداد نرون ۱۵ و دو خروجی (سیب سالم و لهیده) بکار برده شد. در این طبقه بندی تقسیم بندی داده ها به داده های آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش به صورت تصادفی صورت گرفته است. معیار ارزیابی عملکرد سیستم بر اساس خطای آنتروپی مقاطع است. ماتریس اغتشاش شکل ۶ نشان می‌دهد که دقت طبقه بندی برای شناسایی سیب‌ها در دو کلاس سیب- های سالم و لهیده با استفاده از ویژگی های استخراجی برای داده های آموزش و آزمون ۱۰۰٪ می‌باشد. همچنین شکل (۷) بیانگر نمودار عملکرد طبقه بندی بر اساس خطای آنتروپی - مقاطع است که نشان می‌دهد بهترین عملکرد شبکه در تکرار ۳۸ ام اتفاق می‌افتد. نتایج ارائه شده نشان داد که با ایجاد لهیدگی بر روی سیب‌ها تغییراتی که در نرخ سرد و گرم شدن سیب‌ها ایجاد شده است در تصاویر گرمایی موجب تمایز بین سیب لهیده و سالم و در نتیجه دقت بالای شبکه عصبی مصنوعی برای طبقه بندی می- شود.

| Output Class | Target Class | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 1 | 2 | |
| 1 | 20 50.0% | 0 0.0% | 100% 0.0% |
| 2 | 0 0.0% | 20 50.0% | 100% 0.0% |
| | 100% 0.0% | 100% 0.0% | 100% 0.0% |

شکل ۶- ماتریس اغتشاش حاصل از طبقه بندی سیب در دو کلاس سالم و

نمادها

جدول ۵- معرفی نمادها استفاده شده در مقاله

| کمیته | نماد | واحد |
|---|------------|-------------------------------------|
| ضریب نفوذ حرارتی | α | - |
| طول موج | λ | $\mu\text{m}, \text{nm}$ |
| ضریب گسیلندگی | ϵ | $\text{W}/\text{m}^2.\text{K}^2$ |
| چگالی | ρ | kg/m^3 |
| ثابت استفان-بولتزمن | σ | $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4$ |
| ظرفیت گرمایی ویژه | C_p | $\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$ |
| ضریب هدایت حرارتی | k | $\text{W}/\text{m}.\text{K}$ |
| جرم اولیه نمونه | M_1 | g |
| جرم نمونه بعد از خشک شدن | M_2 | g |
| محتوی رطوبت بر پایه خشک | MC | - |
| دما | T | $^\circ\text{C}$ |
| شدت گرمای تابشی ساطع شده از هر واحد سطح | w | W/m^2 |

می‌باشد. می‌توان دریافت که سامانه گرمانگاری تضاد خوبی را بین بافت سالم و لهیده به روش فعال ایجاد می‌کند. بر مبنای نتایج حاصل از این تحقیق، روش گرمانگاری فعال روشی توانمند، غیر مخرب، مفید و سریع با دقت بالا به منظور تشخیص سیب‌های لهیده از سیب‌های سالم می‌باشد که می‌تواند برای محصولات که لهیدگی در سطح محصول خیلی واضح نمی‌باشد (مانند سیب رد دلشیز) توسعه یابد. بنابراین مشاهده گردید که با استفاده از روش گرمانگاری فعال و شبکه عصبی مصنوعی می‌توان دقت کار دستگاه‌های درجه‌بند میوه سیب را افزایش داد. نتایج این تحقیق نشان داد که دقت طبقه بندی سیب لهیده از سالم ۱۰۰ می‌باشد همچنین این روش قادر به کلاسهای مختلف لهیدگی سیب (چهار سطح لهیده) با دقت مناسب (۹۴٪) می‌باشد. پیشنهاد می‌گردد در اعمال روش گرمانگاری از روش سرد کردن نمونه‌ها استفاده شود.

REFERENCES

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.

Barreiro, P., Ortiz, C., Ruiz-Altisent, M., Schotte, S., Andani, Z., Wakeling, I., Beyt, P. (1998). Comparison between sensory and instrumental measurements for mealiness assessment in apples. A collaborative test. *Journal of Texture Studies* 29, 509-525.

Chelladurai, V., Jayas, D., White, N., 2010. Thermal imaging for detecting fungal infection in stored wheat. *Journal of stored products research* 46, 174-179.

Dosti, I., Golzarian, A., Aghkhani, M.R., & Sadriani, M. (2015). Study the changes in the color and temperature of the apple texture during time using the visual and thermal images processing. *Iranian Journal of Food Science and Technology*. 11 (5), 677-693. In Farsi

Dosti, I., Golzarian, A., Aghkhani, M.R., & Sadriani, M. (2013). A review of thermal imaging applications in the analysis of agricultural products quality. *8th National Congress on Agricultural Machinery Engineering, Mashhad University, Mashhad, Iran, pp. 534-542.*

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. FAOSTAT database. <http://faostat.fao.org/faostats>.

Hellebrand, H.J., Beuche, H., Linke, M. (2002). Thermal Imaging. *Physical Methods in Agriculture*. Springer, pp. 411-427.

Hellebrand, H., Herppich, W., Beuche, H., Dammer, K., Linke, M., Flath, K. (2006). Investigations of plant infections by thermal vision and NIR imaging. *International agrophysics* 20, 1.

Jamil, N., Bejo, S.K. (2014). Husk Detection Using Thermal Imaging Technology, *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 128 – 135.

Leemans, V. & Destain, M. F. 2004. A real-time grading method of apples based on features extracted from defects. *Journal of Food Engineering*, 61, 83-89.

Lima, R.S.N., Garcia-Tejero, I., Lopes, T.S., Costa, J.M., Vaz, m., and Duran-Zuazo, V.H. (2015). Linking thermal imaging to physiological indicators in Carica papaya, under different watering regimes. *Agricultural Water Management* 164, 148-157.

Manickavasagan, A., Jayas, D. S., White, N. D. G., & Paliwal, J. 2010a. Wheat Class Identification Using Thermal Imaging. *Food Bioprocess Technol*, 3, 450-460

Qing, Z., Ji, B., Zude, M. (2007). Wavelength selection for predicting physicochemical properties of apple fruit based on near-infrared spectroscopy. *Journal of food quality* 30, 511-526.

Stockton, G.R. and Lucas, R.G. (2012), Using aerial infrared thermography to detect utility theft of service, SPIE Defense, Security, and Sensing, International Society for Optics and Photonics.

Teimouri, N., Omid, M., Mollazade, K., Rajabipour, A., 2015. Separation of clinging almonds and their qualitative classification by combining image processing techniques and artificial neural networks. *Biosystem engineering of Iran* 46, 355-362. (In Farsi)

- Varith, J., Hyde, G., Baritelle, A., Fellman, J., Sattabongkot, T. (2003). Non-contact bruise detection in apples by thermal imaging. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 4, 211-218.
- Van Zeebroeck, M., Tijssens, E., Dintwa, E., Kafashan, J., Loodts, J., De Baerdemaeker, J., Ramon, H. (2006). The discrete element method (DEM) to simulate fruit impact damage during transport and handling: model building and validation of DEM to predict bruise damage of apples. *Postharvest Biology and Technology* 41, 85-91.
- 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.
- Xing, J., Baerdamaker, J. (2005). Fresh Bruise detection on selected cultivars apples using visible and NIR spectroscopy. *Information and Technology for Sustainable Fruit and Vegetable Production. Frutic* 5, 503-507.
- 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.