

بررسی تغییرات رنگ و دمای بافت لهیده سیب در طول زمان با استفاده از پردازش تصاویر مرئی و گرمایی

امید دوستی ایرانی^۱، محمود رضا گلزاریان^{۲*}، محمد حسین آق خانی^۳، حسن صدر نیا^۴

۱۳۹۳/۰۴/۱۷

۱۳۹۳/۱۱/۰۲

چکیده

هدف از انجام این تحقیق بررسی تغییرات ایجاد شده در بافت لهیده سیب در طول زمان است. در تصاویر مرئی از شاخص زردی و در تصاویر گرمایی از شاخص دما جهت بررسی تغییرات استفاده شد. نتایج نشان داد که با گذشت زمان از مقدار شاخص زردی بافت لهیده تا حدود ۱۵ روز پس از لهیدگی کاسته شده و بعد از این مرحله روند افزایشی پیدا می‌کند. نتایج حاصل از تصویربرداری گرمایی نشان داد که دمای بافت لهیده تا ۴۸ ساعت پس از اعمال ضربه خنک‌تر از بافت سالم، از ۵۶ تا ۹۶ ساعت تقریباً هم‌دما و پس از ۹۶ ساعت گرم‌تر از بافت سالم، با اختلافی بین ۰/۵-۱ درجه سلسیوس است. به منظور بررسی شاخص زردی از طرح آزمایشی فاکتوریل بر پایه طرح‌های کاملاً تصادفی استفاده شد. در این طرح اثر سه عامل زمان، انرژی و سطح سیب بر روی شاخص زردی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد اثر زمان و سطح سیب بر روی شاخص زردی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار است. تا ۴۸ ساعت پس از لهیدگی تغییرات رنگ با چشم قابل مشاهده نیست، این در حالی است که در این زمان بافت لهیده سیب خنک‌تر از بافت سالم است. پس از ۴۸ ساعت لهیدگی به صورت کبودی در تصاویر مرئی قابل مشاهده می‌باشد. این در حالی است که در بازه زمانی ۵۶ تا ۹۶ ساعت پس از ضربه، تضاد دمایی بین ناحیه لهیده و بقیه نواحی در تصاویر گرمایی وجود ندارد. با گذشت زمان از ۳۶۰ ساعت به دلیل افزایش شاخص زردی و تغییر رنگ بافت لهیده از کبودی به سمت سفیدی از قابلیت تصاویر مرئی برای تشخیص بافت لهیده کاسته می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سیب، تغییرات رنگ، تغییرات دما، تصاویر مرئی، تصاویر گرمایی

مقدمه

ارزشمند خواهد بود (افکاری سیاح، ۲۰۰۹). در پژوهشی کاهش ارزش اقتصادی سیب ناشی از آسیب‌های مکانیکی در کشور بلژیک تخمین زده شد. در صد سیب‌های لهیده خارج از حد استاندارد در حالی که سیب‌های کبود شده اولویت اصلی این تحقیق بود در سال ۲۰۰۰ میلادی برابر با ۱۵ درصد و در سال ۲۰۰۱ برابر با ۸ درصد گزارش شد. نتایج این تحقیق نشان داد که تنها کاهش ده درصدی در میزان سیب‌های لهیده ناشی از صدمات مکانیکی می‌تواند سبب افزایش درآمدی برابر با ۸۹۲ هزار دلار در سال ۲۰۰۰ و ۵۹۵ هزار دلار در سال ۲۰۰۱ در این شاخه از کشاورزی گردد (Van Zeebroeck *et al.*, 2003). یکی از عواملی که سبب کاهش کیفیت می‌شود اثرات مضر آسیب‌های فشاری می‌باشد که تنها به جنبه‌های بصری آن محدود نمی‌شود و بروز بیماری‌های باکتریایی و آلودگی‌های قارچی را نیز به دنبال دارد که همه این عوامل سبب کوتاه شدن عمر ماندگاری سیب می‌شود. برای اکثر میوه‌ها از جمله سیب کبود شدن بافت از رایج‌ترین آسیب‌های مکانیکی پس از برداشت می‌باشد (Wilson *et*

درصد زیادی از محصولات باغی از جمله سیب هر ساله به دلیل صدمات مکانیکی از بین می‌روند، این در حالی است که سیب یکی از مهم‌ترین محصولات تولیدی باغات کشور محسوب می‌گردد و صادرات ناچیز سیب در مقابل تولید بالای آن به دلیل ضایعات فراوان و عدم کسب استانداردهای لازم برای صادرات می‌باشد (شکر بیگی و همکاران، ۲۰۰۷). آسیب مکانیکی در انواع میوه و سبزی پدیده ناخواسته‌ای است که افزایش میزان فساد و کاهش کیفیت محصول را به همراه دارد بنابراین هر نوع کوششی که بتواند به کاهش آسیب و تخریب مکانیکی در مواد کشاورزی بیانجامد، قطعاً از لحاظ اقتصادی

۱، ۲، ۳ و ۴ - به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، استادیار و دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی
(*) - نویسنده مسئول: (Email: m.golzarian@um.ac.ir)

تصاویر، از روش نسبت طول به ضخامت برای حذف دم گل استفاده کردند. بمنظور ارزیابی سیستم، نتایج درجه‌بندی دید انسانی با نتایج درجه‌بندی ماشین بینایی باهم مقایسه شدند. دقت حذف دم گل ۹۹/۴٪ و دقت کلی درجه‌بندی ۹۵/۲۳٪ بدست آمد. از روش پردازش تصویر برای تشخیص ضرب خوردگی و زنگ سیب رقم گلدن دلشیز (*Golden Delicious*) استفاده شد. در این درجه‌بندی سیب‌ها در شش طبقه سالم، دم، کاسبرگ، ضرب خوردگی، زنگ دمگاه و زنگ خارج از دمگاه تقسیم شدند. برای اصلاح نواحی طبقه‌بندی شده به کلاس ضرب خوردگی، از ویژگی‌های رنگ مایه^۲ و اشباعیت رنگ^۳ از فضای رنگی HSI استفاده شد. اصلاح نواحی در کلاس‌های کاسبرگ، زنگ دمگاه و زنگ خارج از دمگاه بر اساس فاصله گرانی گاه دم تا گرانی گاه هر ناحیه انجام می‌شود. نتایج این تحقیق نشان داد که دقت درجه‌بندی درست برای ۱۲۰ تصویر سیب، ۸۱/۶۶٪ است (باژن و کبیر، ۲۰۰۹). در پژوهشی دیگر به بررسی تغییرات تصویر سیب رقم گلدن دلشیز در طول زمان پرداخته شد. تغییرات نمودار هیستوگرام هرکدام از کانال‌های رنگی قرمز، سبز و آبی برای این تصاویر تعیین شد. با مقایسه آماری داده‌ها معنی‌دار بودن اثر گذشت زمان انبارداری بر روی تغییرات رنگ قرمز، سبز و آبی در سطح ۵ درصد حاصل شد. این تحقیق نشان داد که باگذشت زمان شدت رنگ قرمز تا هفته چهارم کاهش و سپس افزایش یافته است. همچنین شدت مؤلفه رنگ سبز از حدود ۱۶۵ به حدود ۱۵۳ کاهش پیدا کرده و مؤلفه رنگ آبی تصاویر سیب‌ها در انبار از حدود ۵۲ به ۳۷ حرکت کرده و روند کاهشی را طی کرده است (اصغری و همکاران، ۲۰۱۴).

تصاویر گرمانگاری^۴

گرمانگاری و استفاده از نقشه‌های گرمایی بعنوان شیوه‌ای غیر مخرب در تشخیص عیوب استفاده می‌شود. گرمانگاری به دو صورت قابل اجرا است: گرمانگاری غیرفعال^۵ و گرمانگاری فعال^۶. گرمانگاری غیرفعال بر اندازه‌گیری گسیل‌های حرارتی تحت تغییرات طبیعی دما بین بافت سالم و لهیده تأکید دارد. این در حالی است که در گرمانگاری فعال از یک منبع حرارتی خارجی جهت حرارت دادن شی مورد مطالعه استفاده می‌شود (Meola and Carlomagno, 2004). پژوهشگران در تحقیقی از فناوری گرمانگاری برای طبقه‌بندی مغز

(*al.*, 1999). کوفتگی یا لهیدگی به معنای آسیب زدن به بافت میوه توسط یک نیروی خارجی است که سبب تغییرات فیزیکی در بافت و تغییرات شیمیایی در رنگ و طعم می‌شود. این پدیده یکی از مهم‌ترین دلایلی است که سبب می‌شود به هنگام بازرسی سیب‌های لهیده شده در درجات کیفی پایین‌تر قرار بگیرند (Xing and Baerdemaeker, 2005). اکثر آسیب‌های مکانیکی در انواع میوه و سبزی در اثر تنش‌های تماسی تحت بارهای استاتیکی، شبه استاتیکی و ضربه‌ای ایجاد و موجب کاهش کیفیت محصول و ارزش اقتصادی آن می‌شوند (قاسمی و همت، ۲۰۱۴). سامانه‌های درجه‌بندی موجود قادر نیستند که بصورت مؤثر میوه‌هایی را که مدت‌زمان کوتاهی قبل از جداسازی لهیده‌اند، از میوه‌های سالم جدا کنند. دلیل این پدیده این است که بسیاری از سامانه‌های جداسازی از قابلیت انعکاس نور مرئی پراکنده در نزدیکی مادون قرمز نزدیک استفاده می‌کنند. بنابراین آن‌ها در تشخیص میوه‌هایی که بافت لهیده آن‌ها به رنگ قهوه‌ای درآمده است تمرکز دارند. درحالی‌که در ساعات اولیه پس از لهیدگی ممکن است بافت لهیده به رنگ قهوه‌ای درنیامده باشد (Xing and Baerdemaeker, 2005). پس از آن که سیب دچار لهیدگی می‌شود باگذشت زمان آثار لهیدگی بر روی ناحیه لهیده سیب مشاهده می‌شود. تا به امروز نتایج محققین نشان می‌دهد که پس از ایجاد لهیدگی به دلیل فعل‌وانفعالات شیمیایی که درون بافت سیب اتفاق می‌افتد دچار تغییر رنگ شده و رنگ سیب از زرد به قهوه‌ای تغییر می‌کند. ولی این نتایج تا ساعاتی معمولاً ۴۸ ساعت پس از ایجاد لهیدگی گزارش شده است. این درحالی است که ممکن است تحت شرایط مختلف از جمله مدت‌زمان سپری شده پس از لهیدگی تغییرات در رنگ به نحوی دیگر باشد. هنگام لهیدگی به دلیل آسیب دیدن سلول‌های بافت سیب مایع درون سلولی از درون سلول‌ها به بین سلول‌ها منتقل شده و منجر به تغییرات شیمیایی از جمله تغییر در رنگ می‌گردد. اگر باگذشت زمان مایع بین سلولی تخییر شود ممکن است سبب تغییر رنگ در بافت لهیده شود و از حالت قهوه‌ای تغییر رنگ دهد. باگذشت زمان رطوبت موجود در بافت لهیده شده از این ناحیه خارج شده و رنگ قهوه‌ای آن از بین می‌رود و یک بافت چوب‌پنبه‌ای که در سطح پوست میوه روشن و سفید دیده می‌شود به‌جا می‌ماند (Mohsenin, 1986).

درجه‌بندی با کمک تصاویر مرئی^۱

پوردربانی و همکاران (۲۰۱۰) از سامانه ماشین بینایی برای درجه‌بندی سیب رقم گرانی اسمیت (*Granny Smith*) بر اساس صدمات سطحی استفاده کردند. یکی از مشکلات در ارتباط با درجه‌بندی سیب وجود دم گل بود که در تصاویر باینری با نواحی معیوب اشتباه گرفته می‌شود. برای حذف این خطا و در پردازش این

³ Hue

⁴ Saturation

⁴ Thermal images

⁵ Passive thermography

⁶ Active thermography

¹ Visible images

استفاده کردند. الگوی تغییرات دما در سطح میوه کبود شده نشان داد که اختلاف دمایی بین بافت سالم و لهیده وجود دارد و بین $0/5^{\circ}\text{C}$ تا $1/5^{\circ}\text{C}$ تغییر می‌کند. این آزمایش در دمای محیط حدود 25°C درجه سلسیوس انجام شد. این نتیجه همچنین حاصل شد که در گرما نگاری غیرفعال حدود ۴۸ ساعت پس از اعمال ضربه به سیب بافت کبود شده قابل تشخیص می‌باشد. بیشترین اختلاف دمایی مشاهده شده برای رقم جاناگلد و کمترین اختلاف در رقم گلوستر مشاهده شد که می‌تواند ناشی از اختلاف در استحکام بافت آن‌ها باشد (Baranowski *et al.*, 2008). در پژوهشی دیگر، از روش گرما نگاری برای تشخیص بیماری آب‌گزیدگی سیب^۴ استفاده شد. درجه حرارت حاصل شده از سیب یک پارامتر مناسب جهت ارزیابی تفاوت در خواص دمایی بین سیب‌های مبتلا به این پدیده و سیب‌های سالم در نظر گرفته شده است. نرخ افزایش دما برای سیب‌هایی که در مراحل اولیه گرمادهی بودند، در سیب‌های لهیده بطور قابل‌ملاحظه‌ای کمتر از سیب‌های سالم بود. نتایج تحقیق نشان داد که یک ارتباط خوب بین تغییرات دمایی و تراکم بافت میوه وجود دارد (Baranowski *et al.*, 2008). در پژوهشی دیگر، با استفاده از روش گرما نگاری فعال به تشخیص زودهنگام لهیدگی در سیب پرداخته شد که نتایج این تحقیق حاکی از خنک‌تر بودن بافت لهیده شده نسبت به بافت سالم در ساعات اولیه پس از اعمال ضربه بود. با استفاده از پاسخ‌های گرمایی دریافت شده از بافت کبود شده به هنگام فرستادن پالس‌های حرارتی عمق و حجم ناحیه کبود شده تخمین زده شد (Baranowski *et al.*, 2009).

روش تشخیص بافت لهیده شده با استفاده از تصاویر گرمایی

برای تشخیص لهیدگی سیب، وسیله تصویربرداری گرمایی باید قادر به تشخیص اختلاف دمایی بین بافت سالم و لهیده باشد. هنگامی که بافت سیب دچار لهیدگی می‌شود بر اثر پاره شدن دیواره سلولی مایع درون سلولی به فضای خالی بین سلول‌ها منتقل می‌شود. از طرفی بافت ضربه دیده نسبت به بافت سالم متراکم‌تر می‌شود که سبب افزایش در تراکم بافت سیب می‌گردد. چهار خاصیت دمایی اصلی در انتقال حرارت که سبب تشخیص لهیدگی سیب می‌شوند عبارت‌اند از: نفوذ گرمایی^۵، هدایت حرارتی^۶، ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی که ارتباط بین این چهار مورد مطابق با رابطه (۱) می‌باشد (Stroshine, 1998).

$$\alpha = \frac{K}{\rho C_p} \quad (1)$$

پسته سالم و آلوده به قارچ *Aspergillus flavus*^۱ استفاده کردند. بهترین تیمار بدست‌آمده شامل ضربه گسیلندگی ۹۵٪، دمای گرم‌کن 90°C ، زمان گرم کردن پسته برابر ۹۰ ثانیه و زمان خنک شدن پسته در دمای اتاق برابر با ۱۰ ثانیه بود. در این تحقیق یک الگوریتم طبقه‌بندی بر اساس مقدار آستانه (TBC^۲) برای آنالیز تصاویر گرمایی و طبقه‌بندی پسته‌های سالم و آلوده در نرم‌افزار متلب توسعه یافت که دارای بالاترین دقت طبقه‌بندی نسبت به روش‌های اعتبار سنجی کابخشی (KFCV)، تحلیل تفکیک خطی (LDA)، تحلیل تفکیک درجه دوم (QDA)، ماشین‌ردار پشتیبان (SVM) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) یعنی ۱۰۰ درصد برای طبقه‌بندی پسته سالم و آلوده و $92/23\%$ برای طبقه‌بندی پسته سالم، آلوده یک‌روزه و آلوده بیشتر از یک روز بود (Kheiralipour *et al.*, 2013). شهبابی قویونلویی و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از تصاویر گرما نگاری به‌دست‌آمده از گردو اقدام به شناسایی گردوهای پوک از گردوهای سالم نمودند. بدین منظور تعداد مشخصی گردوی سالم و پوک، با استفاده از یک گرم‌کن صفحه‌ای که با سیستم کنترلر PID^۳ تنظیم می‌شود، تحت یک دمای مشخص در سه زمان ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰ ثانیه قرار داده شد. آن‌ها بیان کردند، تغییرات دمای سطحی نمونه‌ها در نتیجه جذب و دفع گرما نشان‌دهنده تغییرات معنی‌دار بین نمونه‌های سالم و پوک می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان جذب حرارت توسط گردوهای پوک بیشتر از گردوهای سالم بوده است و این به دلیل نفوذ راحت‌تر گرما، در کوتاه‌مدت، به داخل گردو است. این در حالی است که گرم شدن گردوی سالم باوجود فضای پرشده توسط مغز گردو در درون آن، در کوتاه‌مدت کندتر صورت می‌گیرد. سینتیک از دست دادن حرارت در شرایط مختلف آزمایشی نیز نشان داد که روند از دست دادن حرارت در گردوی پوک نیز سریع‌تر از گردوی سالم است. آن‌ها این روش را به‌عنوان یک روش غیر مخرب، سریع و کم‌هزینه جهت جداسازی گردوی سالم از گردوی پوک معرفی کردند (شهبابی قویونلویی و همکاران، ۲۰۱۱). Varith و همکاران (۲۰۰۳) از روش گرما نگاری برای تشخیص لهیدگی در سیب پس از گذشت ۴۸ ساعت از شبیه‌سازی لهیدگی استفاده کردند. نتایج حاکی از اختلاف دما بین بافت سالم و لهیده بین ۲-۱ درجه سلسیوس بود، که دلیل آن را اختلاف در قابلیت نفوذ دو بافت سالم و لهیده بیان کردند (Varith *et al.*, 2001). برانوسکی و همکاران (2008)، از گرما نگاری غیرفعال برای تشخیص لهیدگی سه رقم سیب جاناگلد، لیگُل و گُلستر (Janagold, ligol, Gloster)

¹ *Aspergillus flavus*

² Threshold based classification

³ Proportional-integral-derivative controller

⁴ Watercore

⁵ Thermal diffusion

⁶ Thermal conductivity

می‌یابد که نتیجه آن خنک‌تر بودن دمای سطح بافت لهیده نسبت به بافت سالم می‌باشد.

پژوهش‌هایی که تاکنون بر روی لهیدگی سیب انجام شده است، بیشتر به شناسایی آسیب‌های سطحی سیب با استفاده از پردازش تصاویر پرداخته‌اند. علاوه بر شناسایی و درجه‌بندی آسیب‌های سطحی با استفاده از تصاویر مرئی، از تصاویر گرمایی نیز جهت شناسایی برخی از آسیب‌های سطحی سیب استفاده شده است. ولی آنچه در تشخیص لهیدگی سیب اهمیت پیدا می‌کند این است که نمی‌دانیم عمر لهیدگی ایجادشده در بافت سیب چقدر است و با توجه به این موضوع چه علائم ظاهری و فیزیکی ممکن است در سطح سیب رخ دهد. باگذشت زمان رنگ ناحیه لهیده شده دچار تغییر می‌شود، آیا این تغییر با استفاده از تصاویر ثبت‌شده به کمک دوربین‌های مرئی قابل ثبت می‌باشد. آیا رفتار دمایی بافت لهیده همواره ثابت می‌ماند یا خیر. بنابراین اساس این مقاله بر دو فرض استوار است. اول اینکه ویژگی‌های رنگی بافت لهیده شده در طول زمان تغییر می‌کند و این تغییرات با استفاده از تصاویر رنگی قابل ثبت می‌باشد. دوم اینکه اختلاف معناداری بین دمای بافت لهیده شده و بافت سالم وجود دارد و توزیع دما در سطح بافت لهیده (ناحیه دمایی) و رفتار این ناحیه نسبت به بافت سالم در طول زمان تغییر می‌کند. بنابراین هدف اول این مقاله بررسی تغییرات بافت لهیده سیب با استفاده از ویژگی‌های رنگی تصاویر در سه ناحیه فوقانی، میانی و تحتانی سیب با شعاع‌های انحناء مختلف در سه سطح انرژی ضربه‌ای می‌باشد و هدف دوم بررسی رفتار دمایی آن در طول زمان و تعیین قابلیت تشخیص لهیدگی در دو روش تصویربرداری مرئی و حرارتی در زمان‌های مختلف پس از ایجاد لهیدگی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مواد

جهت انجام این آزمایش تعداد ۶۰ نمونه سیب رقم گلدن دلشیز با متوسط وزنی ۱۱۹ گرم تهیه شد. به هنگام تهیه نمونه‌ها دقت شد که سیب‌هایی که انتخاب می‌شوند بدون لهیدگی قبلی باشند. پنج نمونه سیب جهت انجام آزمایش تعیین مرحله رسیدگی و پنج نمونه دیگر جهت تعیین ضریب گسیلندگی سیب به صورت کاملاً تصادفی از میان نمونه‌ها انتخاب شدند. برای تعیین مرحله رسیدگی سیب از دستگاه رفرکتومتری جهت تعیین غلظت مواد جامد محلول^۱ (SSCs) استفاده شد (Baranowski et al., 2009). برای هر پنج نمونه این آزمایش در سه تکرار انجام شد (جدول ۲). جهت اندازه‌گیری ضریب گسیلندگی^۳

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

اگرچه به نظر می‌رسد قابلیت نفوذ در بافت لهیده کمتر از بافت سالم باشد ولی نتایج Varith و همکاران (۲۰۰۱) نشان داد که قابلیت نفوذ در این ماده کشاورزی نیز مرتبط با عوامل ذکرشده فوق می‌باشد. برای این منظور هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی بافت سالم و لهیده سیب اندازه‌گیری شد. ضریب هدایت حرارتی با در نظر گرفتن عمر آسیب‌دیدگی و نوع سیب در بافت لهیده ۲۶-۹ درصد بیشتر از بافت سالم بود. چگالی بافت لهیده ۵٪ بیشتر از بافت سالم بود. در ظرفیت گرمایی ویژه بین دو بافت سالم و لهیده اختلافی مشاهده نشد. با در نظر گرفتن رابطه نفوذ حرارتی گرمایی، تغییر در ضریب هدایت حرارتی (K) بر تغییر در چگالی غلبه دارد مقدار نفوذ حرارتی حدود ۲۰-۴ درصد در بافت لهیده بیشتر از بافت سالم بود. نتایج حاصل از روش مدل‌سازی المان محدود نیز نتایج فوق را تأیید کرد و نشان داد که ضریب انتشار حرارتی در بافت لهیده بزرگ‌تر از بافت سالم بود. از طرف دیگر، هنگامی که دما در بافت لهیده تغییر می‌کند میزان گسیل گرما از آن نیز دچار تغییر می‌شود. دوربین حرارتی با دریافت و ثبت امواج گسیل‌شده در دامنه فروسرخ از سطح سیب یک نقشه گرمایی از آن ارائه می‌دهد. مطابق با قانون استفان بولتزمن^۱، شدت گرمایی ساطع شده از واحد سطح با توان اول ضریب گسیلندگی و با توان چهارم دمای سطح متناسب است (رابطه ۲). نتایج پژوهش وارث و همکاران نشان داد که اختلاف معناداری بین ضریب گسیلندگی بافت سالم و لهیده سیب وجود ندارد و بنابراین اختلاف دمای ثبت‌شده در نقشه‌های گرمایی برای بافت سالم و لهیده به علت وجود دمای سطح متفاوت است (Varith et al., 2003). رابطه زیر شدت گرمایی تابشی ساطع شده از سطح که متناسب با دما و ضریب گسیلندگی می‌باشد را نمایش می‌دهد.

$$w = \delta \varepsilon T^4 \quad (2)$$

w ، شدت گرمایی تابشی ساطع شده از هر واحد سطح (w/m^2)، δ ، ثابت بولتزمن برابر با $5.673 \times 10^{-8} (w/m^2 \cdot k^4)$ ، ε ضریب گسیلندگی، T ، دمای سطح (k).

بعبارت دیگر، میزان گسیل با ضریب گسیلندگی فرق می‌کند و این به دلیل این است که میزان گسیلش علاوه بر ضریب گسیلندگی به دما نیز وابسته است. بنابراین ممکن است میزان گسیلش یک بافت با بافت دیگر متفاوت باشد ولی ضریب گسیلش هر دو بافت باهم یکسان باشد. اختلاف دمایی مشاهده‌شده بین بافت سالم و لهیده سیب می‌تواند بیشتر به دلیل تغییر در قابلیت نفوذ این دو بافت باشد. در بافت لهیده به دلیل بیشتر بودن نفوذ حرارتی آن نسبت به بافت سالم حرارت از سطح خارجی سیب به بافت داخلی آن سریع‌تر انتقال

² Soluble solids concentrations

³ Emission factor

¹ Stephan-Boltzmann's law

غیرقابل پیش بینی اتفاق بیفتد و میزان انرژی اعمال شده به هنگام ضربه نامعلوم باشد، بنابراین شبیه سازی اعمال ضربه در سه سطح انرژی و در سه سطح سبب و هر سطح در پنج تکرار صورت گرفت. سطوح انرژی طوری باید انتخاب شوند که اول، در میوه سبب ایجاد لهدی شود. دوم، میزان لهدی ایجاد شده از حد استاندارد خارج نباشد. جهت جلوگیری از آسیب رسیدن به سایر نقاط سبب مرکز ضربه زن را بر نقاطی که انحنای آن ها از قبل اندازه گیری و علامت گذاری شده بود منطبق و ضربه اعمال شد. به منظور جلوگیری از آسیب دیدن سایر نقاط، سبب را با موم محکم کردیم. جهت اعمال ضربه از ماشین ضربه زن پاندولی (وزن ضربه زن برابر با ۷۹۶/۰ کیلوگرم و طول ضربه زن برابر با ۰/۱۹۶ متر)، و ضربه زن تخت استفاده شد. طبق اصول دینامیک آونگ این دستگاه طوری طراحی شده است که مرکز ضربه در سر ضربه زننده و مرکز دوران در محل محور قرار داده شده است تا از انتقال نیرو و ایجاد عکس العمل حاصل از ضربه جلوگیری کند. اصول حاکم بر دستگاه ضربه زن از رابطه (۴) پیروی می کند. بر اساس این رابطه زوایای متناظر با در نظر گرفتن سه سطح انرژی ۷۰۰، ۲۰۰ و ۱۲۰۰ میلی ژول به ترتیب برابر با زوایای دوران ۲۵، ۶۰/۸ و ۷۸/۵ درجه می باشد (صدرنیا و عمادی، ۱۳۹۱). پس از اعمال ضربه نمونه ها در یخچال با دمای ۵ درجه در مدت ۲۶ روز نگهداری شدند.

$$E = mgh(1 - \cos\alpha) \quad (4)$$

که در آن: E (انرژی ضربه ای بر حسب ژول)، m (جرم کل آونگ بر حسب کیلوگرم)، g (شتاب گرانش بر حسب متر بر مجذور ثانیه)، h (فاصله مرکز دوران تا مرکز جرم آونگ بر حسب متر)، α (زاویه دوران بر حسب درجه).

تصویربرداری مرئی و گرمایی

با توجه به اینکه تصویربرداری در دو طیف مرئی و فروسرخ انجام شد، برای هر روش از یک سیستم تصویربرداری جداگانه استفاده شد. سیستم تصویربرداری گرمایی شامل دوربین حرارتی، پایه نگاه دارنده دوربین، محفظه عایق و یک سیستم کامپیوتری جهت ذخیره تصاویر ثبت شده بر روی کارت حافظه دوربین بود (شکل ۲). جهت تصویربرداری مرئی از اتاقک تصویربرداری (شکل ۳) استفاده شد (گلزاریان و همکاران، ۲۰۱۴). تصاویر در طیف مرئی توسط یک دوربین Nikon Coolpix P510 (Nikon Inc, Japan) با قدرت تفکیک ۱۶/۱ مگا پیکسل تهیه شد. به منظور قرارگیری کامل نمونه ها در حوزه دید دوربین ها، با توجه به فاصله کانونی لنزها در دوربین های مورد استفاده در حالت تصویربرداری مرئی فاصله بین دوربین و نمونه ها ۲۳cm و در حالت تصویربرداری گرمایی، فاصله بین دوربین و نمونه ها ۱۵cm در نظر گرفته شد. برای تهیه نقشه های گرمایی از نمونه های ضربه دیده، نمونه ها بلافاصله بعد از خارج شدن از یخچال

از روش ماده آزمون استفاده شد. برای این منظور یک ماده با گسیلندگی بالا (در این تحقیق، نوار عایق سیاه با ضریب گسیلندگی ۰/۹۷) و مشخص به نام ماده آزمون در تماس با پوست سبب قرار گرفت. نمونه ها در یک محفظه عایق که تغییرات دما در آن بسیار کم بود، قرار گرفتند، مقدار ضریب گسیلندگی بر روی دوربین مطابق با نوارچسب تنظیم شد. سپس به کمک دوربین گرما نگاری InfRec (NEC Avio Infrared Technologies Co G100Ex)، که قابلیت تصویربرداری آن در دامنه دمایی ۴۰- تا ۱۵۰۰°C، رزولوشن ۰/۰۸°C در دمای ۳۰°C، ۳۲۰x۲۴۰ پیکسل گرمایی و دامنه طیفی آن ۸-۱۴ میکرومتر بود، دو نقطه بر روی پوست سبب و نوارچسب ثابت شد و دمای این دو نقطه بر روی نوارچسب و سبب قرائت شد. پس از قرائت دما ضریب گسیلندگی در محدوده ۰/۹ تا ۰/۹۷ به دست آمد. با تغییر ضریب گسیلندگی هنگامی که دمای سبب کمترین اختلاف دمایی را با دمای نوارچسب داشته باشد می توان گفت که ضریب گسیلندگی سبب برابر با مقدار تنظیم شده بر روی دوربین است. در این آزمایش کمترین اختلاف دمایی بین سبب و نوارچسب در ضریب گسیلندگی ۰/۹۴ مشاهده شد (جدول ۲).

جهت شبیه سازی لهدی در بافت سبب سه نقطه بر روی هر سبب در سه ناحیه سبب شامل ناحیه میانی، ناحیه فوقانی و ناحیه تحتانی مشخص و علامت گذاری شد (شکل ۱). با توجه به اینکه میزان انحنای در این سه ناحیه متفاوت می باشد. شعاع انحنای نقاط به عنوان معیاری جهت معرفی این نقاط به دست آمد. برای این منظور پس از مشخص نمودن محل ضربه میزان انحنای آن با یک انحنای سنج (با دقت ۰/۱ میلی متر و دامنه اندازه گیری ۱۰ میلی متر) قرائت شد و توسط رابطه (۳) شعاع انحنای نقاط محاسبه شد. این آزمایش برای هر سطح در ۱۵ تکرار انجام شد که نتایج آن در جدول (۱) بیان شده است. از میان نمونه ها ۴۵ عدد سبب که فاقد هرگونه آسیب دیدگی ظاهری بودند انتخاب شدند و در سه سطح انرژی ضربه ای (۱۲۰۰، ۷۰۰، ۲۰۰ میلی ژول) تقسیم و شبیه سازی ضربه در سه سطح سبب (فوقانی، میانی، تحتانی) انجام شد.

$$R = \frac{(AC)^2}{8(BD)} + \frac{BD}{2} \quad (3)$$

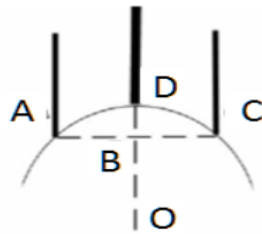
در رابطه ۳، AC فاصله بین دوشاخک انتهایی انحنای سنج و BD میزان عقب نشینی شاخک میانی نسبت به دو نقطه A و C می باشد. در شکل (۱) طرحواره شیوه اندازه گیری شعاع انحنای در سه ناحیه سبب نمایش داده شده است.

شبیه سازی اعمال ضربه جهت ایجاد لهدی در بافت

سبب: قبل از اعمال ضربه نمونه ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۲۰ درجه سلسیوس در داخل آون نگهداری شدند. با توجه به اینکه ایجاد لهدی در سبب ممکن است در حالت های مختلف و

همچنین سبب می‌شد نمونه‌ها که در دمای زیر پنج درجه سلسیوس نگهداری شده بودند با محیط داخل محفظه تبادل گرمایی داشته باشند.

به محفظه تصویربرداری گرمایی منتقل می‌شدند و پس از گذشت ۴۰ ثانیه از هر سبب یک تصویر گرمایی تهیه شد. در این بازه زمانی ۴۰ ثانیه‌ای، علاوه بر اینکه دوربین گرمایی آماده تصویربرداری شده



شکل ۱- شماتیک اندازه‌گیری شعاع انحنای در سه ناحیه سبب

تصاویر مرئی تهیه‌شده در نرم‌افزار در اندازه استاندارد خود توسط نرم‌افزار ذخیره شدند.

ماتریس تصاویر گرمایی در نرم‌افزار متلب خوانده شد و با استفاده از رابطه ۵ مقادیر ماتریس در محدوده صفر تا یک به دست آمد. با استفاده از این رابطه ماتریس تصویر گرمایی به یک تصویر با مقیاس خاکستری تبدیل می‌شود.

$$I(i, j) = \frac{T(i, j) - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (5)$$

$I(i, j)$ مقدار جدید نقطه (i, j) در تصویر خاکستری به دست 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 حاصل از تصویر گرمایی. پس از اعمال پیش‌پردازش مناسب بر روی تصویر مرئی به منظور از بین بردن اختلافی که در تصویر مرئی و گرمایی وجود دارد. این تصویر به تصویر باینری متناظر با ماتریس تصویر گرمایی تبدیل شد. سپس با ضرب تصویر باینری در ماتریس خاکستری حاصل از تصویر گرمایی پیش‌زمینه از تصویر خاکستری حذف شد. سپس از هر تصویر خاکستری مقادیر پیکسل‌های بافت لهیده و بافت سالم آن استخراج شد (شکل ۴)؛ به دلیل این که این مقادیر اعدای بین صفر و یک می‌باشند بمنظور دست‌یابی به مقادیر واقعی دما از رابطه (۶) استفاده شد و دمای استخراج‌شده در تصاویر گرمایی موردبررسی قرار گرفت.

$$T = I(i, j) \cdot (T_{max} - T_{min}) + T_{min}; \quad (6)$$

در این رابطه T دمای واقعی هر پیکسل در تصویر نهایی می‌باشد.

در آنالیز تصاویر مرئی همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود پس از فراخوانی تصاویر در نرم‌افزار متلب از هر سبب بافت لهیده و قسمت‌هایی از بافت سالم آن انتخاب و پس‌از آن ویژگی‌های رنگی از نواحی موردنظر در سه محیط رنگی HSI, RGB و $L^*a^*b^*$ استخراج

لازم به ذکر است که از هیچ منبع حرارتی به هنگام تصویربرداری گرمایی استفاده نشد. اگرچه استفاده از یک منبع گرمایی سبب نمایش تضاد بهتر در تصاویر گرما نگاری شود ولی به دو دلیل از منبع حرارتی استفاده نشد: اولاً، به دلیل اینکه نمونه‌ها در دمایی نزدیک به ۵ درجه سلسیوس نگهداری شده بودند با قرار گرفتن در دمای محیط حدود ۲۴ درجه سلسیوس تبادل گرمایی خوبی بین نمونه و هوای اطراف آن صورت می‌گرفت و دوماً، به دلیل اینکه نمونه‌ها می‌بایست برای مدت زمانی حدوداً یک ماه مورد تصویربرداری قرار می‌گرفتند. بنابراین استفاده از یک منبع حرارتی احتمال کاهش کیفیت و کاهش عمر ماندگاری نمونه را به شدت افزایش می‌داد. دوربین گرمایی این قابلیت را دارد که همزمان علاوه بر تصویر گرمایی یک تصویر مرئی نیز تهیه کند. از ترکیب تصویر مرئی با نقشه گرمایی برای آنالیز تصاویر گرمایی در نرم‌افزار مربوطه و پردازش بیشتر تصاویر به دست آمده گرمایی در نرم‌افزارهای تخصصی پردازش تصویر R2011a (Mathworks Inc, US) استفاده شد. پس از تصویربرداری گرمایی، از نمونه‌ها در اتاقک تصویربرداری، تصاویر در طیف مرئی تهیه شد. تصویربرداری در طول زمان ۲۶ روز نگهداری برابر با ۶۲۴ ساعت و در زمان‌های ۰.۲، ۰.۴، ۰.۸، ۱.۶، ۳.۲، ۶.۴، ۱۲.۸، ۲۵.۶، ۵۱.۲، ۱۰۲.۴، ۲۰۴.۸، ۴۰۹.۶، ۸۱۹.۲، ۱۶۳۸.۴، ۳۲۷۶.۸، ۶۵۵۳.۶، ۱۳۱۰۷.۲، ۲۶۲۱۴.۴، ۵۲۴۲۸.۸، ۱۰۴۸۵۷.۶، ۲۰۹۷۱۵.۲، ۴۱۹۴۳۰.۴، ۸۳۸۸۶۰.۸، ۱۶۷۷۷۲۱.۶، ۳۳۵۵۴۴۳.۲، ۶۷۱۱۱۸۶۶.۴، ۱۳۴۲۲۳۷۲.۸، ۲۶۸۴۴۷۴۵.۶، ۵۳۶۸۹۴۹۱.۲، ۱۰۷۳۷۸۹۸۲.۴، ۲۱۴۷۵۷۹۶۴.۸، ۴۲۹۵۱۵۹۲۸.۶، ۸۵۹۰۳۱۸۵۷۷.۲، ۱۷۱۸۰۳۷۱۵۵۵۴.۴، ۳۴۳۶۰۷۴۳۱۱۰.۸، ۶۸۷۲۱۴۸۶۲۲۲۱.۶، ۱۳۷۴۴۲۹۳۲۴۴۳.۲، ۲۷۴۸۸۵۸۶۴۴۸۶۶.۴، ۵۴۹۷۷۱۷۲۸۹۳۳۲.۸، ۱۰۹۹۵۴۳۴۵۷۸۶۶۵.۶، ۲۱۹۹۰۸۶۹۱۱۵۷۳۳۱.۲، ۴۳۹۸۱۷۳۸۲۳۱۴۶۶۶.۴، ۸۷۹۶۳۴۷۶۴۶۲۸۳۳۳۲.۸، ۱۷۵۹۲۶۹۳۳۲۴۶۶۶۶۵.۶، ۳۵۱۸۵۳۸۶۶۴۴۹۳۳۳۱۱.۲، ۷۰۳۷۰۷۷۳۳۲۸۹۶۶۶۲۲.۴، ۱۴۰۷۴۱۴۶۶۶۴۹۳۳۳۲۴۴.۸، ۲۸۱۴۸۲۹۳۳۲۸۹۶۶۶۴۸۹.۶، ۵۶۲۹۶۵۸۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۱۹.۲، ۱۱۲۵۹۳۱۷۳۳۲۸۹۶۶۶۹۷۸۳.۶، ۲۲۵۱۸۶۳۴۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۳۷۶۶.۴، ۴۵۰۳۷۲۶۹۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۵۵۴.۸، ۹۰۰۷۴۵۳۸۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۷۴۱۰۸.۱۶، ۱۸۰۱۴۹۱۷۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱.۶، ۳۶۰۲۹۸۳۴۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳.۲، ۷۲۰۵۹۶۶۹۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷.۴، ۱۴۴۱۱۹۳۳۸۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳.۶، ۲۸۸۲۳۸۶۷۷۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷.۲، ۵۷۶۴۷۷۳۴۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳.۶، ۱۱۵۲۹۵۴۶۹۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷.۲، ۲۳۰۵۹۰۹۳۸۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳.۶، ۴۶۱۱۸۱۸۷۷۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳.۲، ۹۲۲۳۶۳۷۵۴۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳.۶، ۱۸۴۴۷۲۷۱۰۹۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۳۶۸۹۴۴۲۱۸۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۷۳۷۸۸۸۴۳۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳.۲، ۱۴۷۵۷۷۶۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۲۹۵۱۵۵۳۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۵۹۰۳۱۰۶۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۱۱۸۰۶۲۱۳۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳.۲، ۲۳۶۱۲۴۲۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۴۷۲۲۴۸۵۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۹۴۴۴۹۷۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۱۸۸۸۹۴۱۳۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳.۲، ۳۷۷۷۸۸۲۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۷۵۵۵۷۶۵۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۱۵۱۱۱۵۲۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۳۰۲۲۳۰۵۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳.۲، ۶۰۴۴۶۱۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۱۲۰۸۹۲۲۱۳۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۲۴۱۷۸۴۴۲۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۴۸۳۵۶۸۵۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۹۶۷۱۳۷۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۱۹۳۴۷۴۱۳۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۳۸۶۹۴۸۲۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۷۷۳۸۹۶۵۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۱۵۴۷۷۹۲۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۳۰۹۵۵۸۵۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۶۱۹۱۱۷۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۱۲۳۸۲۴۱۳۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۲۴۷۶۴۸۲۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۴۹۵۲۹۶۵۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۹۹۰۵۹۳۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۱۹۸۱۱۸۰۱۳۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۳۹۶۲۳۶۲۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۷۹۲۴۷۲۵۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۱۵۸۴۹۴۵۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۳۱۶۹۸۹۰۱۳۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۶۳۳۹۷۸۰۲۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۱۲۶۷۹۵۶۱۳۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۲۵۳۵۹۱۲۲۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۵۰۷۱۸۲۴۵۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۱۰۱۴۳۶۹۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۲۰۲۸۷۳۸۰۱۳۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۴۰۵۷۴۷۶۰۲۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۸۱۱۴۹۵۲۰۵۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۱۶۲۲۹۹۴۰۱۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۳۲۴۵۹۸۸۰۲۱۳۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۶۴۹۱۹۷۶۰۴۲۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۱۲۹۸۳۹۲۰۸۵۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۲۵۹۶۷۸۴۰۱۷۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۵۱۹۳۵۶۸۰۳۴۱۳۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۱۰۳۸۷۱۳۶۰۶۸۲۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۲۰۷۷۴۲۷۲۰۱۳۶۵۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۴۱۵۴۸۵۴۴۰۲۷۳۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۸۳۰۹۷۰۸۸۰۵۴۶۱۳۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۱۶۶۱۹۴۱۷۶۰۱۰۹۲۲۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۳۳۲۳۸۸۳۵۲۰۲۱۸۴۵۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۶۶۴۷۷۶۷۰۴۳۶۹۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۱۳۲۹۵۵۳۴۰۸۷۳۸۰۱۳۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۲۶۵۹۱۰۶۸۰۱۷۴۷۶۰۲۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۵۳۱۸۲۱۳۶۰۳۴۹۵۲۰۵۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۱۰۶۳۶۴۲۷۲۰۶۹۹۰۱۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۲۱۲۷۲۸۵۴۴۰۱۳۹۸۰۲۱۳۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۴۲۵۴۵۶۸۸۰۲۷۹۶۰۴۲۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۸۵۰۹۱۳۷۶۰۵۵۹۲۰۸۵۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۱۷۰۱۸۲۷۵۲۰۱۱۱۸۴۰۱۷۴۷۶۰۴۲۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۳۴۰۳۶۵۵۰۲۲۳۶۸۰۳۴۹۵۲۰۸۵۳۳۲۸۹۶۶۶۹۵۱۰۷۳۷۶۲۱۱۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷۳۷.۲، ۶۸۰۷۳۱۰۰۰۴۴۷۳۶۰۶۹۹۰۱۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۱۳۶۱۴۶۲۰۰۸۹۴۷۳۶۰۶۹۹۰۱۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۲۷۲۲۹۲۴۰۰۱۷۸۹۴۷۳۶۰۶۹۹۰۱۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۵۴۴۵۸۴۸۰۰۳۵۷۸۹۴۷۳۶۰۶۹۹۰۱۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۱۰۸۹۱۶۹۶۰۰۷۱۵۷۸۹۴۷۳۶۰۶۹۹۰۱۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۲۱۷۸۳۳۲۰۰۱۴۳۱۵۷۸۹۴۷۳۶۰۶۹۹۰۱۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۴۳۵۶۶۶۴۰۰۲۸۶۳۱۵۷۸۹۴۷۳۶۰۶۹۹۰۱۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۸۷۱۳۳۲۸۰۰۵۷۲۶۳۱۵۷۸۹۴۷۳۶۰۶۹۹۰۱۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۱۷۴۲۶۶۵۶۰۰۱۱۴۵۲۶۳۱۵۷۸۹۴۷۳۶۰۶۹۹۰۱۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۳۴۸۵۳۳۱۲۰۰۲۲۹۰۵۲۶۳۱۵۷۸۹۴۷۳۶۰۶۹۹۰۱۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۶۹۷۰۶۶۲۴۰۰۴۵۸۰۱۰۵۲۶۳۱۵۷۸۹۴۷۳۶۰۶۹۹۰۱۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۱۳۹۴۱۲۴۴۸۰۰۹۱۶۰۲۱۰۵۲۶۳۱۵۷۸۹۴۷۳۶۰۶۹۹۰۱۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۲۷۸۸۲۴۸۹۶۰۰۱۸۳۲۱۰۵۲۶۳۱۵۷۸۹۴۷۳۶۰۶۹۹۰۱۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۵۵۷۶۴۹۹۲۰۰۳۶۶۴۲۱۰۵۲۶۳۱۵۷۸۹۴۷۳۶۰۶۹۹۰۱۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳۳.۶، ۱۱۱۵۲۹۹۶۴۰۰۷۳۲۸۴۲۱۰۵۲۶۳۱۵۷۸۹۴۷۳۶۰۶۹۹۰۱۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳۳.۶، ۲۲۳۰۵۹۹۲۸۰۰۱۴۶۵۶۸۴۲۱۰۵۲۶۳۱۵۷۸۹۴۷۳۶۰۶۹۹۰۱۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳۳.۶، ۴۴۶۱۱۹۸۵۶۰۰۲۹۳۱۳۶۵۶۸۴۲۱۰۵۲۶۳۱۵۷۸۹۴۷۳۶۰۶۹۹۰۱۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳۳.۶، ۸۹۲۲۳۹۷۱۲۰۰۵۸۶۲۷۳۱۳۶۵۶۸۴۲۱۰۵۲۶۳۱۵۷۸۹۴۷۳۶۰۶۹۹۰۱۰۶۶۴۹۳۳۳۲۸۹۹۴۷۵۴۴۳۳۳.۶، ۱۷۸۴۴۷۴۲۲۴۰

دمای بافت سالم و آسیب دیده سیب در زمان های تصویربرداری از آزمون t- زوجی استفاده شد

نتایج و بحث

در جدول (۱) نتایج حاصل از اندازه گیری شعاع انحناء سیب نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می شود بیشترین شعاع مربوط به ناحیه میانی برابر با ۳۱/۸ میلی متر و کمترین شعاع مربوط به ناحیه تحتانی سیب برابر با ۱۲/۸۵ میلی متر می باشد.

در جدول (۲) نتایج حاصل از اندازه گیری سطح رسیدگی سیب، وزن و ضریب گسیلندگی بیان شده است. همان طور که مشاهده می شود از لحاظ رسیدگی میزان مواد جامد محلول برابر با ۱۴/۴۷ درصد، متوسط وزنی نمونه ها ۱۱۹ گرم و مقدار میانگین ضریب گسیلندگی برابر با ۰/۹۴ بدست آمد. پژوهشگران جهت تشخیص بیماری آب گزیدگی سیب و ارزیابی کیفی سطح سیب از ضریب گسیلندگی ۰/۹۶ استفاده کردند (Baranowski et al., 2008) و (Veraverbeke et al., 2006). اختلاف مشاهده شده در ضریب گسیلندگی می تواند ناشی از ویژگی های سطح سیب از جمله رنگ آن باشد.

بررسی تغییرات شاخص زردی بافت لهیده سیب

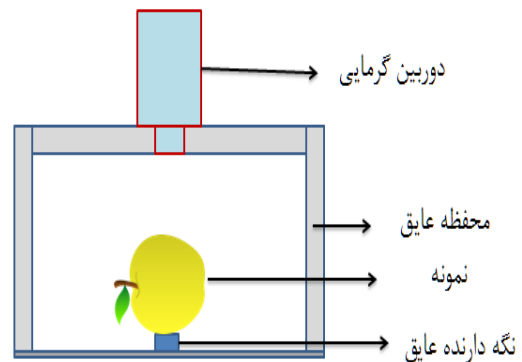
نتایج حاصل از بررسی تغییرات رنگ بافت لهیده شده سیب در طول زمان ۶۲۴ ساعت نشان داد که پس از ایجاد ضربه که منجر به لهیدگی در بافت سیب می شود، تغییرات شیمیایی نیز در این بافت شروع می شود. نتیجه تغییرات شیمیایی، پس از گذشت زمان ایجاد تغییرات رنگ در بافت است که با بررسی تصاویر مرئی قابل مشاهده و اندازه گیری می باشد. با در نظر گرفتن شاخص زردی در بافت لهیده سیب مشاهده می شود که این شاخص با گذشت نزدیک به ۳۶۰ ساعت پس از اعمال ضربه روند کاهشی داشته و رنگ پوست در ناحیه لهیده زرد تیره (با شاخص زردی ۰/۲۵) می شود و پس از آن شاخص زردی مجدداً روند افزایشی دارد (شکل ۶). در شکل (۶) تصاویری که با شماره های ۱، ۲ و ۳ نمایش داده شده اند به ترتیب نشان دهنده بافت لهیده شده یک سیب در ۱۰، ۳۶۰ و ۶۲۴ ساعت پس از اعمال ضربه می باشد.

همان طور که مشاهده می شود با گذشت زمان ابتدا رنگ بافت لهیده شده به سمت قهوه ای شدن و پس از آن به سمت سفیدی حرکت کرده است. نتایج آماری حاصل از تجزیه واریانس نشان می دهد اثر زمان بر روی شاخص زردی سیب در سطح احتمال یک درصد معنی دار بوده است (جدول ۳). همچنین مقایسه میانگین ها به روش آزمون چند دامنه ای دانکن در سطح احتمال یک درصد نشان داد که بین زمان های ۱۰ و ۳۶۰ ساعت پس از لهیدگی اختلاف معنی داری

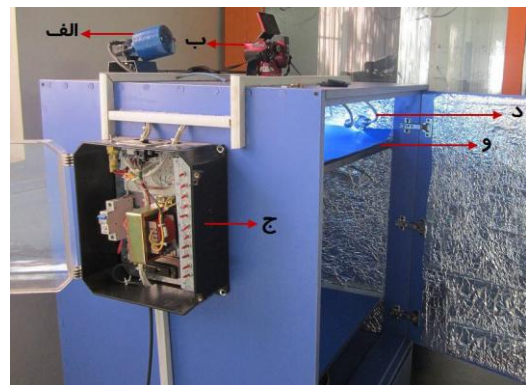
شدند. از آنجاکه سیب های مورد آزمایش در این تحقیق سیب زرد لبنانی بود، تغییرات میزان زرد بودن پوست ناحیه لهیده یا شاخص زردی^۱ در طول زمان در تصاویر مرئی مورد مطالعه قرار گرفت. این شاخص توسط ترکیب کانال های رنگی اصلی مطابق با رابطه (۷) به دست آمد. سپس تغییرات آن در طول زمان مورد بررسی قرار گرفت.

$$EYI=1.5r+b-1.5g \quad (7)$$

در این رابطه، r بیانگر کانال قرمز، b بیانگر کانال آبی و g بیانگر کانال سبز تصویر هست.



شکل ۲- شکل شماتیک سیستم تصویربرداری گرمایی

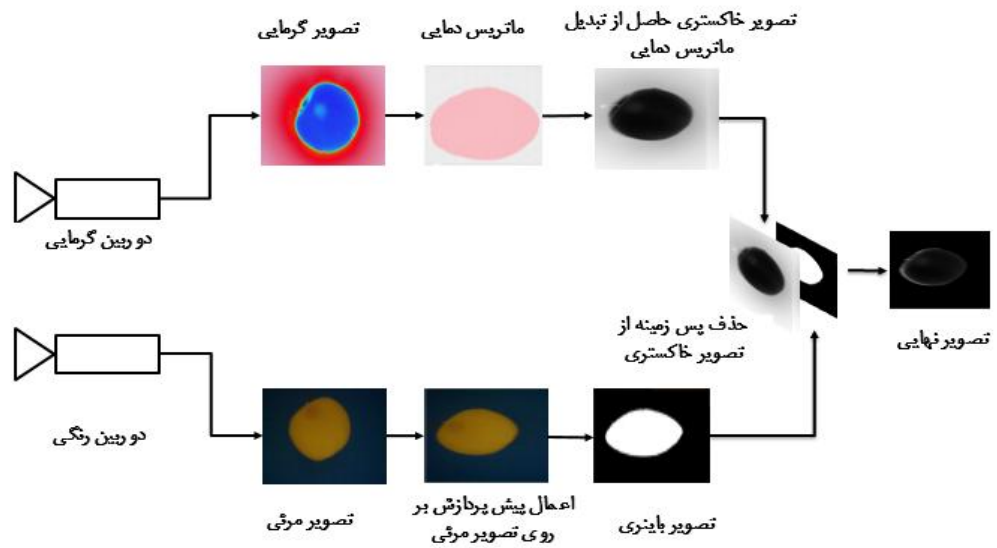


شکل ۳- اتاقک عکس برداری. الف) موتور، جهت تغییر ارتفاع صفحه ی پس زمینه. ب) دوربین که بر روی پایه ی اتاقک نصب شده است. ج) تابلوی کنترل روشنایی و لامپ های LED و راه اندازی موتور بالابرنده. د) لامپ LED به همراه پایه. و) صفحه ی پس زمینه

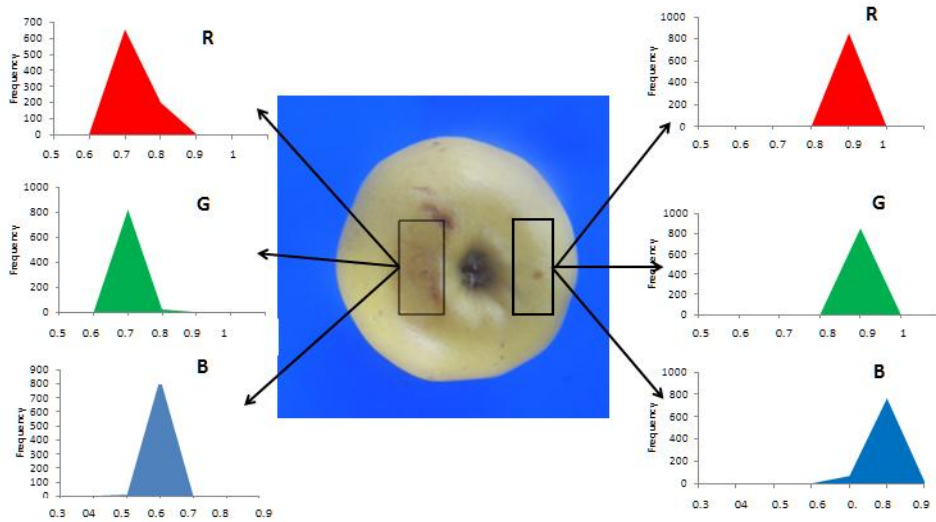
بمنظور تجزیه و تحلیل داده ها از دو نرم افزار SPSS16 و Excel2013 استفاده شد. به منظور بررسی اثر زمان، انرژی و سطح سیب، هر کدام در سه سطح بر روی شاخص زردی سیب از طرح فاکتوریل بر پایه طرح های کاملاً تصادفی و به منظور مقایسه میانگین ها از آزمون دانکن استفاده شد. به منظور مقایسه میانگین

¹ Excessive yellow index

در سطح اطمینان ۹۹ درصد وجود دارد. ولی بین زمان‌های ۱۰ و ۶۲۴ ساعت اختلاف معنی‌داری مشاهده نمی‌شود (جدول ۴).



شکل ۴- نحوه استخراج ویژگی‌های موردنظر از تصاویر گرمایی



شکل ۵- استخراج کانال‌های رنگی دو بافت سالم و لهیده سیب. سمت راست مربوط به بافت سالم و سمت چپ مربوط به بافت لهیده. R، G و B به ترتیب کانال‌های رنگی قرمز، سبز و آبی ناحیه مشخص شده سیب می‌باشند.

جدول ۱- نتایج حاصل از اندازه‌گیری شعاع انحناء

شعاع انحناء	تعداد	کمترین شعاع	بیشترین شعاع	میانگین	انحراف معیار
ناحیه تحتانی	۱۵	۱۲/۲۰	۱۴/۲۹	۱۲/۸۵	۰/۶۶
ناحیه میانی	۱۵	۲۴/۹۰	۴۰/۴۰	۳۱/۸۰	۴/۲۷
ناحیه فوقانی	۱۵	۱۵/۲۳	۱۷/۶۳	۱۶/۴۳	۰/۶۵

جدول ۲- نتایج حاصل از اندازه‌گیری سطح رسیدگی، وزن و ضریب گسیلندگی

فاکتور مورد اندازه‌گیری	تعداد	میانگین	انحراف معیار	واریانس
میزان مواد جامد محلول (درصد)	۱۵	۱۴/۴۷	۰/۶۰۱	۰/۳۶۲
متوسط وزنی (گرم)	۴۵	۱۱۹	۱۸/۰۵	۳۲۶/۱۰
ضریب گسیلندگی (E)	۱۰	۰/۹۴	۰/۱۰	۰

انرژی و سطح سیب بر روی شاخص زردی سیب معنی‌دار است.

بررسی اثر سطوح انرژی و شعاع انحناء بر روی شاخص زردی

شاخص زردی سیب در سه ناحیه تحتانی، میانی و فوقانی سیب در سه سطح انرژی ۲۰۰، ۷۰۰ و ۱۲۰۰ میلی ژول نیز مورد بررسی قرار گرفت. روند تغییرات در این شاخص در هر سه ناحیه مشابه بوده است. در شکل (۷) تغییرات شاخص زردی سیب در سه سطح انرژی در سه ناحیه با شعاع‌های انحناء متفاوت نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در سطح انرژی ۲۰۰ میلی ژول مقادیر شاخص زردی برای سطح فوقانی سیب دارای کمترین مقدار است و با افزایش در میزان انرژی مقدار شاخص زردی روند افزایشی داشته است.

در شکل ۸ تغییرات شاخص زردی با در نظر گرفتن سه سطح انرژی در سه ناحیه فوقانی، میانی و تحتانی سیب نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش در میزان انرژی ضربه‌ای شاخص زردی نسبت به دو ناحیه دیگر کمتر دچار تغییر شده است و در واقع با میزان انرژی ضربه‌ای رابطه عکس دارد. این در حالی است که در دو ناحیه میانی و تحتانی سیب با افزایش در میزان انرژی ضربه‌ای تغییری در روند تغییرات شاخص زردی مشاهده نمی‌شود.

در شکل ۷ روند تغییرات شاخص زردی سه ناحیه سیب در سطح انرژی ۷۰۰ میلی ژول نمایش داده شده است. در این حالت نیز مقادیر شاخص زردی برای ناحیه تحتانی سیب بیشترین مقادیر را به خود اختصاص داده است. در ناحیه میانی همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش در میزان انرژی مقادیر شاخص زردی به مقادیر آن در ناحیه تحتانی نزدیک شده است؛ و مقادیر ناحیه میانی کمترین مقادیر را به خود اختصاص داده است. در سطح انرژی ۱۲۰۰ میلی ژول نیز روند تغییرات مشابه با تغییرات در سطح ۷۰۰ میلی ژول باشد و مقادیر شاخص زردی در ناحیه فوقانی بسیار نزدیک به این مقادیر در ناحیه تحتانی سیب می‌باشد. همان‌طور که نتایج حاصل از اندازه‌گیری شعاع انحناء نشان داد مقدار شعاع انحناء در ناحیه تحتانی برابر با ۱۲/۸۵ و در ناحیه فوقانی سیب برابر با ۱۶/۴۳ میلی متر می‌باشد. این در حالی است که شعاع انحناء در ناحیه میانی سیب ۳۱/۸۰ میلی متر می‌باشد و تفاوت چشمگیری با دو ناحیه فوقانی و تحتانی سیب دارد. این بدان

بنابراین با در نظر گرفتن سه بازه زمانی، در بازه اول بافت سیب پس از لهیدگی تا زمانی که شروع به تغییر رنگ نکند با سیستم بینایی در طیف مرئی قابل مشاهده نمی‌باشد. در بازه دوم که شاخص رنگی بافت لهیده اختلاف زیادی نسبت به بافت سالم دارد و به سمت رنگ قهوه‌ای میل می‌کند، استفاده از سیستم بینایی در طیف مرئی به دلیل تغییر رنگی که ایجاد می‌شود می‌تواند در تشخیص لهیدگی مورد استفاده قرار گیرد و در بازه زمانی سوم از تضاد بین بافت لهیده و سالم کاسته شده است. با پیشروی در این بازه زمانی به دلیل هم‌رنگ شدن این دو ناحیه از قابلیت سیستم بینایی مرئی کاسته می‌شود.

اگرچه تشخیص زود هنگام لهیدگی در سیب از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد. ولی لازم به ذکر است که با توجه نامشخص بودن عمر لهیدگی، مدت زمان انتقال از مزرعه به انبار و شرایط رطوبت و دما که در تسریع یا کندی این فرایند تأثیرگذار است، ممکن است به هنگام درجه‌بندی سیب با هر یک از سه بازه زمانی فوق مواجه شویم. کاهش مشاهده شده در ۳۶۰ ساعت پس از لهیدگی در شاخص زردی می‌تواند ناشی از تغییرات شیمیایی درون بافت سیب باشد. چراکه تغییر در میزان رطوبت، میزان حل شدن مواد جامد بافت سیب از جمله مواد قندی، سبب تغییر در رنگ می‌شود. به عبارت دیگر در زمان ۳۶۰ ساعت ماکزیمم میزان حل شدگی مواد جامد و به دنبال آن بیشترین کاهش در شاخص زردی مشاهده شده است. همچنین با توجه به جدول (۳) مشاهده می‌شود که علاوه بر زمان شعاع انحناء نیز بر روی شاخص زردی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار است ولی عامل انرژی اثر معنی‌داری بر روی شاخص زردی ندارد.

معنی‌دار بودن عامل سطح سیب به دلیل تغییر در شعاع انحناء نواحی و احتمالاً متفاوت بودن نوع بافت و همچنین متفاوت بودن دریافت انرژی در این نواحی است. برای مثال در ناحیه تحتانی سیب سطحی که دچار لهیدگی می‌شود به دلیل کوچک‌تر بودن شعاع انحناء نیروی ضربه‌ای بیشتری را نسبت به سطح لهیده شده در ناحیه میانی که شعاع انحناء بزرگ‌تری دارد دریافت می‌کند. در جدول (۵) نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها حاصل از آزمون چند دامنه‌ای دانکن نشان می‌دهد که بین دو ناحیه میانی و فوقانی اختلاف معنی‌داری قابل مشاهده نیست ولی در مقایسه ناحیه تحتانی سیب با دو ناحیه میانی و فوقانی در سطح احتمال یک درصد اختلاف معنی‌داری مشاهده می‌شود.

نتایج تجزیه واریانس همچنین نشان می‌دهد که تنها اثر متقابل

گرمایی مناسب تراز سیستم تصویربرداری مرئی جهت شناسایی لهیدگی می‌باشد. در این بازه زمانی هنوز اثرات لهیدگی بر روی سیب که با چشم قابل مشاهده باشند آشکار نمی‌شوند. در بازه زمانی مشخص شده با شماره ۲ یعنی از ۴۸ ساعت به بعد تصاویر مرئی به دلیل آشکار شدن اثرات ظاهری لهیدگی، که تغییر رنگ به سمت کبودی می‌باشد، قابلیت تشخیص لهیدگی را دارند و این قابلیت تا ۳۵۰ ساعت پس از لهیدگی به دلیل افزایش میزان کبودی یا کاهش شاخص زردی بافت لهیده، وجود دارد؛ و پس از آن از قابلیت تصاویر مرئی برای شناسایی و تشخیص لهیدگی سیب‌ها به دلیل افزایش در شاخص زردی کاسته می‌شود.

در بازه زمانی ۴۸ تا ۹۶ ساعت تصاویر گرمایی قادر به شناسایی لهیدگی نبوده ولی همان‌طور که در بازه زمانی مشخص شده با شماره ۳ مشاهده می‌شود باگذشت زمان تصاویر گرمایی قادر به تشخیص بافت لهیده از بافت سالم می‌باشند. به هنگام ضربه دیدن بافت سیب به علت نیروی فشاری وارد شده به دیواره سلولی سبب پاره شدن این بافت و انتقال مایع درون سلولی به بین سلول‌ها می‌گردد و سبب 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.

بنابراین عامل تأثیرگذار در تغییرات دمای بافت سالم و لهیده ضریب نفوذ گرمایی می‌باشد. با توجه به اینکه ضریب هدایت حرارتی بافت لهیده بیشتر از بافت سالم می‌باشد، نفوذ حرارتی بافت لهیده نیز بیشتر از بافت سالم بوده و نتیجه آن این است که دمای بافت لهیده خنک‌تر از بافت سالم نمایش داده می‌شود. بزرگ‌تر بودن ضریب رسانش گرمایی به معنای انتقال بیشتر حرارت از سطح بیرونی بافت به سطح درونی آن می‌باشد که سبب خنک‌تر بودن دما در سطح بافت می‌گردد.

با توجه به شکل (۹) از هر بازه تنها تعدادی از زمان‌ها جهت نمایش مقادیر دما در هر بازه زمانی آورده شده است. به‌عنوان نمونه در ۱۰ ساعت پس از لهیدگی اختلاف دمایی بین بافت سالم و لهیده برابر با ۰/۵ درجه سلسیوس، نتایج در این زمان حاکی از غیریکنواخت بودن دما در ناحیه لهیده شده و پراکندگی آن‌ها دارد و این به این معناست که در ناحیه لهیده نقاط با دماهای مختلف وجود دارد. دلیل دیگر این پراکندگی می‌تواند اختلاف دمای نقاط مرزی در اطراف ناحیه لهیده باشد، چراکه در این نواحی که مرزی بین بافت

معناست که دو ناحیه فوقانی و تحتانی تقریباً از لحاظ انحنای سطح شبیه به هم می‌باشند. بنابراین در اثر اعمال ضربه در این دو ناحیه رفتار تقریباً یکسانی انتظار می‌رود. در این نواحی به دلیل تمرکز ضربه در سطح به نسبت کوچک‌تر شدت آسیب‌دیدگی در ساختار سلولی بیشتر می‌باشد. از طرفی با افزایش در سطح انرژی حجم لهیدگی افزایش و حساسیت به لهیدگی سیب کاهش می‌یابد (صدر نیا و عمادی، ۲۰۱۴).

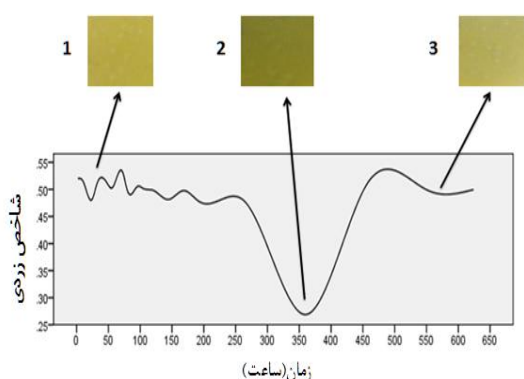
همچنین شدت تبخیر در یک بافت لهیده تا ۴۰۰ برابر بیشتر از بافت سالم می‌باشد. بنابراین می‌توان بیان کرد که روند تغییرات شیمیایی در دو ناحیه فوقانی و تحتانی سیب بسیار سریع‌تر از ناحیه میانی می‌باشد (Wilson et al., 1999).

بررسی تغییرات دمای بافت لهیده سیب در طول زمان

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که بافت لهیده شده سیب پس از اعمال ضربه خنک‌تر از بافت سالم می‌باشد و این روند تا ۴۸ ساعت پس از لهیدگی ادامه دارد. باگذشت زمان پس از ۴۸ ساعت رفتار دمایی بافت لهیده شده تا ۹۶ ساعت پس از لهیدگی تقریباً برابر با رفتار دمایی بافت سالم می‌باشد. بافت لهیده بعد از ۹۶ ساعت شروع به گرم‌تر شدن نسبت به بافت سالم می‌کند و باگذشت زمان اختلاف دمایی بیشتر می‌شود (شکل ۹). بنابراین تصاویر گرمایی در ساعت‌های اول پس از ایجاد لهیدگی تا ۴۸ ساعت قادر به شناسایی بافت لهیده با این ویژگی که دمای آن نسبت به بافت سالم خنک‌تر است، می‌باشند. این در حالی است که در این بازه زمانی تا هنگامی که رنگ بافت لهیده شده در تضاد با بافت سالم قرار نگیرد سیستم بینایی ماشین با دوربین‌های معمولی قادر به شناسایی بافت لهیده نخواهد بود. همچنین در ساعاتی که بافت لهیده شده نسبت به بافت سالم گرم‌تر می‌شود باگذشت زمان به دلیل افزایش شاخص زردی از قابلیت دوربین‌های معمولی کاسته می‌شود.

نتایج آزمون t زوجی به‌منظور مقایسه دما بین بافت سالم و بافت لهیده در جدول (۶) نشان داده شده است. اختلاف میانگین گزارش شده مربوط به تفاضل میانگین بافت سالم از بافت لهیده است. همان‌طور که در جدول فوق مشخص است، بین میانگین دمای دو بافت لهیده و سالم در همه زمان‌ها به‌جز زمان‌های ۶، ۷، ۸ و ۹ اختلاف معناداری در سطح یک درصد وجود دارد. با توجه به مقادیر میانگین گزارش شده در جدول می‌توان نتیجه گرفت در سطح یک درصد بافت لهیده در زمان‌های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ به‌طور معناداری خنک‌تر از بافت سالم بوده است و همچنین در زمان‌های ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۱۹ بافت سالم بطور معناداری خنک‌تر از بافت لهیده بوده است.

همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود روند تغییرات دما بین بافت سالم و لهیده سیب در سه بازه زمانی نمایش داده شده است. در بازه زمانی مشخص شده با شماره ۱ استفاده از سیستم تصویربرداری



شکل ۶- نمودار تغییرات میانگین شاخص زردی بافت لهیده سیب در طول زمان. (۱) بافت سیب در ۱۰ ساعت پس از لهیدگی، (۲) بافت سیب در ۳۶۰ ساعت پس از لهیدگی، (۳) بافت سیب در ۶۲۴ ساعت پس از لهیدگی.

سالم و آسیب دیده می باشد، رفتار دمایی مشابه با رفتار دمایی ناحیه سالم و یا شبیه به آن باشد. در ناحیه دوم از شکل (۹) اختلاف معنی داری بین بافت سالم و آسیب دیده مشاهده نمی شود. در این ناحیه زمانی به دلیل افزایش شدت تبخیر مایعی که در بین سلول ها قرار گرفته است سبب می شود که روند تغییرات عکس شود.

در ناحیه سوم از شکل (۹) معکوس شدن روند تغییرات دمایی دو بافت آسیب دیده و سالم نسبت به یکدیگر مشاهده می شود. در این حالت بافت آسیب دیده سبب شروع به گرم تر شدن نسبت بافت سالم می کند و با گذشت زمان این اختلاف دمایی افزایش می یابد. به عنوان نمونه، در زمان ۵۵۲ ساعت اختلاف دمایی به دست آمده بین بافت سالم و آسیب دیده برابر با ۰/۷۵ درجه سلسیوس می باشد. نتایج به دست آمده از روند تغییرات در سه بازه زمانی که در شکل (۹) نمایش داده شده است، با توجه به روابط (۱) و (۲)، همان طور که اشاره شد به دلیل تغییر در خواص گرمایی بافت لهیده سیب نسبت به بافت سالم اختلاف دمایی به دست آمده قابل توجیه می باشد.

جدول ۳- تجزیه واریانس بررسی اثر زمان، انرژی و شعاع انحناء بر روی شاخص زردی سیب

منبع تغییر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F آماره
زمان	۱/۷۱۲	۲	۰/۸۵۶	۳۳۰/۵۸*
انرژی	۰/۰۱۳	۲	۰/۰۰۷	۲/۵۵
سطح سیب	۰/۰۴۵	۲	۰/۰۲۳	۸/۷۱*
زمان*انرژی	۰/۰۱۷	۴	۰/۰۴۴	۱/۶۸
زمان* سطح سیب	۰/۰۲۰	۴	۰/۰۰۵	۱/۹۶
انرژی* سطح سیب	۰/۰۵۷	۴	۰/۰۱۴	۵/۴۸*
زمان* سطح سیب* انرژی	۰/۰۱۴	۸	۰/۰۰۲	۰/۶۶۴
خطا	۰/۲۸۶	۱۰۸	۰/۰۰۳	-
کل	۲/۱۶۵	۱۳۴	-	-

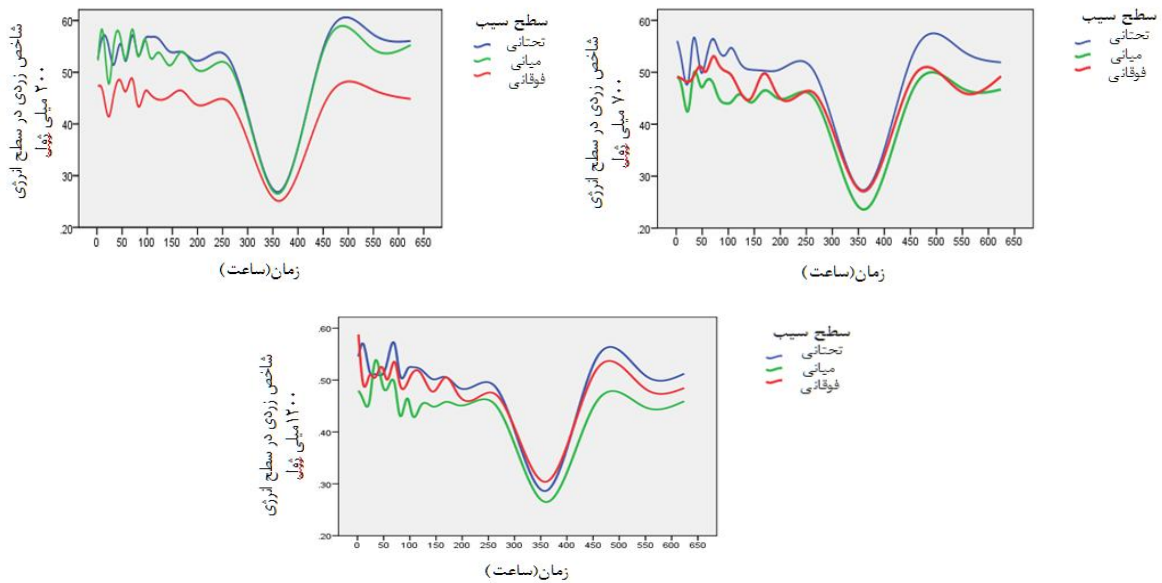
* معنادار بودن اثر زمان در سطح احتمال ۵ درصد

جدول ۴- مقایسه میانگین های شاخص زردی با استفاده از آزمون دانکن

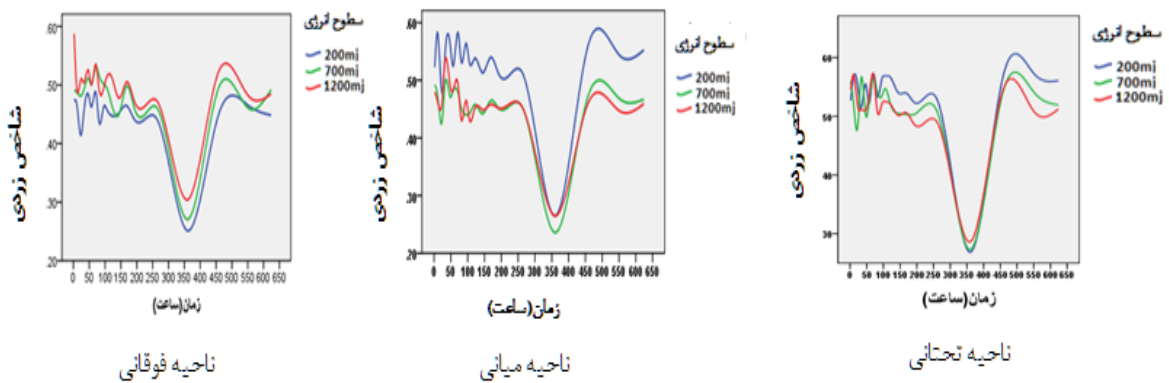
زمان (ساعت)		تعداد	
۰/۰۱	۰/۰۱	۱	۲
-	۰/۲۶۸۹	۴۵	۳۶۰
۰/۴۹۹۵	-	۴۵	۶۲۴
۰/۵۱۵۲	-	۴۵	۱۰
۰/۲۰۸	۱	-	سطح معناداری

جدول (۵). مقایسه میانگین های شاخص زردی با استفاده از آزمون دانکن

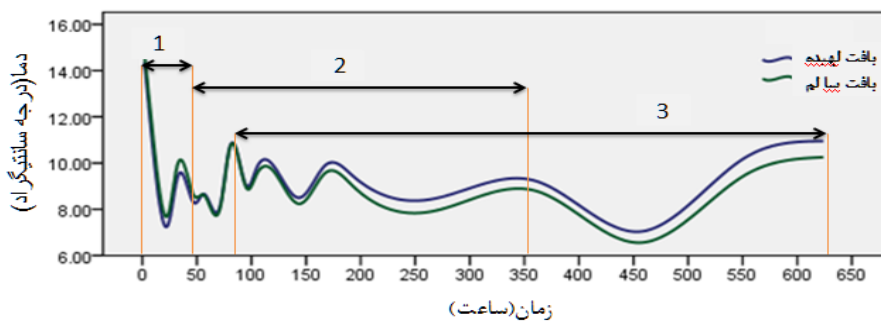
سطح سیب		تعداد	
۰/۰۱	۰/۰۱	۱	۲
-	۰/۴۱۱۶	۴۵	فوقانی
۰/۴۱۸۵	-	۴۵	میانی
۰/۴۵۳۴	-	۴۵	تحتانی
۰/۵۲۶	۱	-	سطح معناداری



شکل ۷- روند تغییرات شاخص زردی در سه سطح تحتانی، میانی و فوقانی سیب



شکل ۸- روند تغییرات شاخص زردی در ناحیه فوقانی سیب در سه سطح انرژی



شکل ۹- نمایش اختلاف دمایی در بافت سالم و لهیده سیب در طول زمان

می‌دهد. در تصویر ۲ نمونه‌ای از این تصاویر در زمان ۵۶ ساعت نمایش داده شده است که همان‌طور که اشاره شد در این ناحیه اختلاف معنی‌داری بین دمای دو بافت سالم و آسیب‌دیده وجود ندارد.

در شکل (۱۰) نمونه‌ای از تصاویر گرمایی در سه بازه زمانی پس از ایجاد لهیدگی نمایش داده شده است. تصویر ۱ در زمان ۳۲ ساعت می‌باشد. که دمای ناحیه لهیده را خنک‌تر از ناحیه سالم نمایش

باگذشت زمان طولانی از لهیدگی رنگ آن به سمت سفید شدن میل می‌کند از قابلیت دوربین‌های مرئی کاسته می‌شود. این در حالی است که دوربین گرمایی بافت لهیده را گرم‌تر از بافت سالم نمایش می‌دهد.

پیشنهادها

با توجه به اینکه رفتار بافت لهیده سیب در طول زمان مشخص شده است جهت تکمیل پژوهش‌ها در این زمینه پیشنهاد می‌شود: با توجه به اینکه در این تحقیق از روش گرما نگاری غیرفعال استفاده شده است. از روش گرما نگاری فعال نیز در بازه زمانی کوتاه‌تری برای بررسی رفتار دمایی بافت لهیده استفاده شود. امکان درجه‌بندی کیفی سیب در ساعات اولیه پس از لهیدگی به دو روش گرما نگاری فعال و غیرفعال مورد بررسی قرار گیرد.

چنانچه از روش گرما نگاری فعال استفاده می‌شود بررسی شود آیا شوک گرمایی وارد شده به سیب بر کیفیت و عمر ماندگاری آن تأثیرگذار است یا خیر؛ و آیا این روش می‌تواند به‌عنوان یک آزمون غیر مخرب در تعیین کیفیت محصول مورد استفاده قرار بگیرد یا خیر.

قدردانی

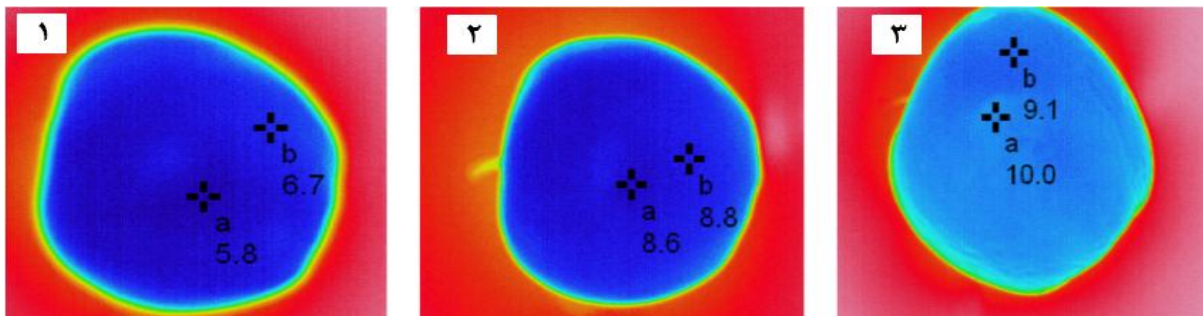
کمال تشکر و قدردانی را از گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد به خاطر در اختیار گذاشتن تجهیزات آزمایشگاهی از جمله دوربین حرارتی و سیستم تصویربرداری مرئی داریم. از آقای دکتر داوری نژاد استاد محترم گروه باغبانی دانشگاه فردوسی به خاطر راهنمایی و نظرات مفیدشان در انتخاب نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش قدردانی می‌کنیم.

در تصویر شماره ۳ نمونه‌ای از تصاویر در زمان ۵۵۲ ساعت نمایش داده شده است که در این حالت دمای بافت لهیده نسبت به بافت سالم بیشتر می‌باشد.

نتیجه‌گیری

بافت لهیده سیب باگذشت زمان دچار تغییر رنگ می‌شود، به‌طوری پس از گذشت زمان ۴۸ ساعت آثار لهیدگی که رنگ آن از زرد به قهوه‌ای تغییر کرده است در ناحیه مرئی و در تصاویر گرفته‌شده از میوه‌ها در این ناحیه قابل مشاهده می‌شود و باگذشت زمان شدت رنگ قهوه‌ای آن افزایش می‌یابد یا به عبارتی از میزان زردی آن کاسته می‌شود. رنگ قهوه‌ای ناشی از لهیدگی سیب به‌صورت دائمی و ماندگار نیست. باگذشت زمان و تبخیر رطوبت بافت لهیده تنها یک بافت چوب‌پنبه‌ای به‌جا می‌ماند و رنگ آن از قهوه‌ای به رنگ سفید تغییر می‌کند و قابلیت تشخیص ناحیه لهیده روی پوست در تصاویر گرفته‌شده در ناحیه مرئی کاهش می‌یابد. استفاده از سامانه‌های درجه‌بندی مجهز به ماشین بینایی در همه زمان‌ها پس از لهیدگی این قابلیت را ندارد که با ضریب اطمینان بالا لهیدگی را تشخیص دهد. پس از ایجاد لهیدگی رفتار دمایی بافت لهیده نسبت به بافت سالم متفاوت می‌باشد. در ساعات اولیه بافت لهیده خنک‌تر از بافت سالم و باگذشت زمان این روند کاملاً برعکس می‌شود، یعنی بافت لهیده گرم‌تر از بافت سالم می‌شود.

اختلاف دمایی مشاهده‌شده بین بافت سالم و آسیب‌دیده بین ۱-۰/۵ درجه سلسیوس متغیر است و در ساعات اولیه پس از لهیدگی (۴۸-۲) که علائمی از لهیدگی مشخص نیست. دوربین گرمایی بافت لهیده را خنک‌تر از بافت سالم نمایش می‌دهند. همچنین هنگامی که



شکل ۱۰- نمونه‌ای از تصاویر گرمایی گرفته‌شده از سیب. (a) نشان‌دهنده دما در ناحیه لهیده. (b) نشان‌دهنده ناحیه سالم. ۱، تصویر گرمایی در ۳۲ ساعت پس از ایجاد لهیدگی. ۲، تصویر گرمایی در ۵۶ ساعت پس از لهیدگی. ۳، تصویر گرمایی در ۵۵۲ ساعت پس از لهیدگی.

جدول ۶- آزمون t زوجی برای مقایسه میانگین دما بین بافت سالم و بافت لهیده

زمان	گروه‌ها	آماره‌های توصیفی		نتایج آزمون		
		تعداد	میانگین	آماره t	درجه آزادی	سطح معناداری (دوطرفه) اختلاف میانگین‌ها
زمان ۱	لهیده	۴۵	۱۴/۳۶۵۲	-۴/۸۴۳	۴۴	۰/۰۰۰
	سالم	۴۵	۱۴/۷۲۵۸			
زمان ۲	لهیده	۴۵	۱۰/۴۷۶۴	-۷/۱۶۵	۴۴	۰/۰۰۰
	سالم	۴۵	۱۱/۰۴۸۸			
زمان ۳	لهیده	۴۵	۷/۳۸۵۷	-۸/۲۷۶	۴۴	۰/۰۰۰
	سالم	۴۵	۷/۸۲۲۱			
زمان ۴	لهیده	۴۵	۹/۳۵۶۳	-۱۱/۱۶۲	۴۴	۰/۰۰۰
	سالم	۴۵	۹/۸۹۷۴			
زمان ۵	لهیده	۴۵	۸/۲۵۷۹	-۴/۹۳۳	۴۴	۰/۰۰۰
	سالم	۴۵	۸/۵۳۵۳			
زمان ۶	لهیده	۴۵	۸/۶۶۰۶	۰/۶۳۳	۴۴	۰/۵۳۰
	سالم	۴۵	۸/۶۳۲۹			
زمان ۷	لهیده	۴۵	۸/۴۰۴۵	-۰/۲۸۱	۴۴	۰/۷۸۰
	سالم	۴۵	۸/۳۸۹۵			
زمان ۸	لهیده	۴۵	۱۰/۶۷۹۶	-۰/۹۷۷	۴۴	۰/۳۳۴
	سالم	۴۵	۱۰/۶۳۵۳			
زمان ۹	لهیده	۴۵	۸/۹۶۸۷	۱/۶۹۷	۴۴	۰/۰۹۷
	سالم	۴۵	۸/۸۷۹۵			
زمان ۱۰	لهیده	۴۵	۹/۷۱۲۵	۴/۷۱۰	۴۴	۰/۰۰۰
	سالم	۴۵	۹/۴۴۵۷			
زمان ۱۱	لهیده	۴۵	۹/۸۹۰۱	۳/۸۷۳	۴۴	۰/۰۰۰
	سالم	۴۵	۹/۶۵۶۸			
زمان ۱۲	لهیده	۴۵	۸/۴۹۸۵	۶/۲۵۷	۴۴	۰/۰۰۰
	سالم	۴۵	۸/۲۳۵۷			
زمان ۱۳	لهیده	۴۵	۹/۹۱۹۰	۶/۶۳۴	۴۴	۰/۰۰۰
	سالم	۴۵	۹/۵۸۷۰			
زمان ۱۴	لهیده	۴۵	۹/۴۷۸۵	۱۰/۱۴۸	۴۴	۰/۰۰۰
	سالم	۴۵	۹/۰۴۳۴			
زمان ۱۵	لهیده	۴۵	۸/۴۳۱۶	۱۳/۲۴۸	۴۴	۰/۰۰۰
	سالم	۴۵	۷/۸۹۹۰			
زمان ۱۶	لهیده	۴۵	۹/۲۲۸۹	۱۰/۸۵۲	۴۴	۰/۰۰۰
	سالم	۴۵	۸/۸۰۰۸			
زمان ۱۷	لهیده	۴۵	۷/۰۳۵۱	۱۲/۵۸۷	۴۴	۰/۰۰۰
	سالم	۴۵	۶/۵۵۶۹			
زمان ۱۸	لهیده	۴۵	۱۰/۲۲۷۲	۱۵/۵۷۰	۴۴	۰/۰۰۰
	سالم	۴۵	۹/۴۷۶۳			
زمان ۱۹	لهیده	۴۵	۱۰/۹۵۴۰	۱۳/۰۳۴	۴۴	۰/۰۰۰
	سالم	۴۵	۱۰/۲۵۵۳			

- Afkary Sayah, A.H, Esmaeilian, M., Minaei, S., Pirayesh, A. 2009. The effect of mechanical loads on apple damages after storage. *Journal of Food Science and Technology*. 5(3):37-44.
- Asghari, A., Azadbakht, M., Ebrahimpour, N. 2014. Investigating the changes of golden delicious apples by using image processing techniques. 8th Congress of Agricultural Engineering (Biosystems) and mechanization. Ferdowsi University of Mashhad. Mashhad, Iran.
- Bazhan, M., Kabir, E. 2009. Detection of surface defects on apple for quality grading. *Journal of Electrical Engineering and Computer Engineering of Iran*. 1:25-34.
- Poordarbani, R., Ghasemzade, H.R., Golzade, A.A., Behfar, H. 2010. Feasibility study of apple quality grading using image processing. *Journal of Food Research*. 19 (1):75-85.
- Shekarbeigi, S., Afkari Sayah, A.H., Shayeghi Moghanlo, H., Shokohian, A.A. 2012. Effect of temperature and padding surface on apple bruise volume due to impact and its prediction by artificial neural network. *Journal of Food Science and Technology*. 8(31): 85-94.
- Sadriani, H., & Emadi, B. (2012). Determine and compare the sensitivity of different varieties of apples to shock loads. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*. 43: 9-17.
- Sadriani, H., Mahdavi, M., Emadi, B. 2014. Determining quality attribute for fruit based on consumer preferences (Case Study: Apple). 8th National Congress of Agricultural Engineering (Biosystems) and Mechanization. Ferdowsi University of Mashhad. Mashhad, Iran.
- Ghoyonloei, M., Etefaghi, A., Ahmadi, H., Kheiralipour, K. 2013. Investigating of temperature changes based on thermal imaging for the diagnosis of osteoporosis Walnut. 7th National Congress of Agricultural Engineering and Mechanisation. Shiraz University. Shiraz, Iran.
- Ghasemi, B., Hemat, A. 2014. Viscoelastic modeling of apples under quasi-static loading using finite element method to investigate the causes of bruising. 8th National Congress of Agricultural Engineering (Biosystems) and Mechanization. Ferdowsi University of Mashhad. Mashhad, Iran.
- Glozarian, M., Sadeghi, F., Ghanei, N., Kazemi, F. 2014. A qualitative and quantitative approach to assessing the performance of contrast enhancing colour indices used in automatic computer vision plant identification system. 8th National Congress of Agricultural Engineering (Biosystems) and Mechanization. Ferdowsi University of Mashhad. Mashhad, Iran.
- Baranowski, P., J. Lipecki, W. Mazurek; and R. T. Walczak. 2008. Detection of water core in 'Gloster' apples using thermography. *Postharvest Biology and Technology* 47: 358-366.
- Baranowski, P., W. Mazurek, Barbara Witkowska-Walczak; and C. Sławinski. 2009. Detection of early apple bruises using pulsed-phase thermography. *Postharvest Biology and Technology* 53: 91-100.
- Kheiralipour, K., Ahmadi, A., Rajabipour, S., Rafiee, M., Javan-nikkhah & Jayas, D. S. 2013. Development of a new threshold based classification model for analyzing thermal imaging data to detect fungal infection of pistachio kernel. *Agricultural Research* 127-131., 2, 127-131.
- Meola, C. and G. M. Carlomagno. 2004. Recent advances in the use of infrared thermography. *Meas. Sci. Technol* 15: 27-58.
- Mohsenin, N. N. 1986. Physical properties of plant and animal materials. 2nd Revised and Updated Edition. Gordon and Breach Science Publishers. New York.
- Stroshine, R. 1998. Thermal properties and moisture diffusivity. Physical properties of agricultural materials and food products, 217-238. *Purdue University*, West Lafayette, IN .
- Van Zeebroeck, M., E. Tijssens, P. Van Liedekerke, V. Deli, J. De Baerdemaeker and H. Ramon. 2003. Determination of the dynamical behaviour of biological materials during impact using a pendulum device. *Sound Vibr* 266: 465-480.
- Varith, J. 2001. Uses of thermal properties for non-destructive assessment of apple quality. Ph.D. Dissertation, *Washington State University*, Pullman, WA.
- Varith, J., G. M. Hyde, A. L. Baritelle, J. K. Fellman; and T. Sattabongkot. 2003. Non-contact bruise detection in apples by thermal imaging. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 4: 211-218.
- Veraverbeke, E. A., P. Verboven, J. Lammertyn, P. C. J. D. Baerdemaeker and B. M. Nicolai. 2006. Thermographic surface quality evaluation of apple. *Journal of Food Engineering*. 77(1):162-168.
- Wilson, L. G. and M. D. Boyette and E. A. Estes. 1999. Postharvest Handling and Cooling of Fresh Fruits, Vegetables, and Flowers for Small Farms, North Carolina Cooperative Extension Service. *Horticulture Information Leaflet* 804.
- Xing, J. and J. D. Baerdemaeker. 2005. Fresh bruise detection on selected cultivars apples using visible and NIR spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology* 45: 176-183

Study of temporal variations of color and temperature on bruised apples using the processing of thermal and visible images

O. Doosti, Irani¹, M. R. Golzarian^{2*}, M. H. Aghkhani³, H. Sadrnia⁴

Received: 2014.07.08

Accepted: 2015.01.22

Introduction: High percentage of orchard products, such as apples, is wasted due to mechanical damages that cause fruit quality loss. Damages due to static or dynamic pressure or impact are among very common mechanical damages that begin to bruise fruits. Post-harvest bruise damage is a major cause for the loss in fruit quality. Bruising means damaging fruit tissue and consequently physical changes resulting in fruit color and chemical changes resulting in fruit tastes (Xing and Baerdemaeker, 2005). Most research projects conducted on apple bruising have focused on the use of image processing techniques for detecting apple surface defects from images. In addition to images taken in visible spectral range, thermal images have been also used for this purpose. Having reviewed the literature and research gaps in this area, we set two hypotheses for this research project: first, the color characteristics of bruised tissue would change over time and these changes would be detectable on the images taken from the affected fruits. Second, there would be a significant difference between the surface temperature of bruised and sound tissues. The distribution of temperature on an impact-caused bruised tissue would change over time in a different manner compared with that for a sound tissue. The color and temperature variation is particularly related to the intensity of impact caused bruising and where the impact is applied on apples.

Therefore, the first objective of this paper was to study the color changes on the tissues bruised from the impacts with three energy levels applied on three locations on apple surface with different curvatures: top, middle and bottom. The second objective was to investigate the temperature variation on the surface of the bruised apples and to examine the capability of visible and thermal imaging in detecting bruised tissues at different times after bruising occurred.

Materials and Methods: For these purposes, the experiments were conducted on sixty apples of Golden Delicious variety. From sixty samples, five apples were used for determining apples ripeness index and five apples were used for determining emissivity factor which was used later in calibrating fruit surface temperatures on thermal images. Bruising was simulated by an impact pendulum. Bruising was conducted at three impact energy levels of 200, 700, 1200 mJ and applied at three locations on apple surfaces: top, middle and bottom. The samples affected by bruising-simulated impacting device were kept in a refrigerator at 5°C and were individually imaged in a regular basis until 624 hours after impact application. At the time of imaging, both visible and thermal images were taken from each sample. Samples visible images were taken in an imaging box with uniform controlled lighting. Thermal images were taken while samples were placed in a box that was thermally insulated from surrounding temperature.

A newly defined color factor, named excessive yellow index (EYI) was extracted from visible color images. The EYI index formula is $EYI = 1.5r + b - 1.5g$ where r, g and b are red, green and blue color values, respectively. Factorial experiment was conducted for the assessment of EYI. This experimental design looked at the effects of three factors of time, impact energy and impact landing location on EYI.

Result and discussion: The results showed that time passed after impact and the location of impact application had significant effect on EYI at 95% confidence interval. The apples EYI index decreased until 15 days after impact application and started increasing thereafter.

Surface temperatures were extracted from the thermal images of samples. The results of processing thermal images showed that the bruised tissue was cooler than the sound tissue until 48 hours after impact application. Both tissues had the same temperature from 56 to 96 hours and then the bruised tissue started becoming warmer by 0.5-1°C after 96 hours.

The color variation of bruised region was not detectable from visible images within the first 48 hours after impact application, while these regions were cooler than undamaged region and detectable from thermal images. The bruised regions started to turn dark brown at 48 hours after impact application. However, there was no temperature difference between bruised and sound regions on fruit surface for the period of 56-96 hours. The bruised brown regions paled after 360 hours. As a result, this reduced the capability of visible images for

1, 2, 3 and 4 are, respectively, Former MSc. student, Assistant Professor, Associate Professor and Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran.

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

discriminating bruised apples from sound ones.

Conclusion: The results of this research show that both the visible spectrum and thermal imaging systems can record the changes in color and temperature at different times after the bruising in apples. Therefore, these methods can be used as an efficient methods for grading apples.

Keywords: Apple; Color variations; Temperature variations; Image Processing, Visible images; Thermal images