



پیش‌بینی غیرمخرب سفتی سیب در طول دوره انبارداری بر پایه تصاویر نقطه‌ای دینامیکی

بهاره جمشیدی^{۱*} - آرمان عارفی^۲ - سعید مینایی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۲۳

چکیده

تصویربرداری بایواسپکل با استفاده از تصاویر نقطه‌ای دینامیکی به‌عنوان یک روش نوری نوین در ارزیابی غیر مخرب کیفیت محصولات کشاورزی - غذایی طی سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، توانایی این روش در ارزیابی شاخص سفتی میوه سیب (رقم رد دلپشس) در طول ۵ ماه انبارداری بررسی شد. برای این منظور، تصاویر نقطه‌ای دینامیکی از نمونه‌های سیب در دو طول موج ۶۸۰ و ۷۸۰ نانومتر به‌طور جداگانه و در طی دوره انبارداری تحصیل و پردازش شد. در این راستا، افزون بر ویژگی‌های مرسوم در تحلیل تصاویر نقطه‌ای دینامیکی، ویژگی‌های مبتنی بر تبدیل موجک و بافت نیز مورد بررسی قرار گرفت. از سوی دیگر، اندازه‌گیری سفتی بافت میوه‌ها از طریق آزمون مخرب نفوذ تعیین شد. در نهایت، توانایی این روش در پیش‌بینی سفتی میوه سیب با تدوین مدل‌های رگرسیون غیرخطی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش مذکور قادر به پیش‌بینی غیر مخرب ویژگی سفتی سیب است. نتایج نشان داد، بهترین مدل واسنجی تدوین شده توانسته با ضریب همبستگی $r_p = 0.81$ و خطای استاندارد $SE_p = 8/4$ N در طول موج ۶۸۰ نانومتر و همچنین ضریب همبستگی $r_p = 0.83$ و خطای استاندارد $SE_p = 8/2$ N در طول موج ۷۸۰ نانومتر، ویژگی سفتی سیب را پیش‌بینی کند.

واژه‌های کلیدی: تبدیل موجک، تصاویر نقطه‌ای دینامیکی، تصویربرداری بایواسپکل، غیر مخرب، لیزر

مقدمه

این که روش‌های مخرب مرسوم برای اندازه‌گیری سفتی میوه سیب عملاً قابلیت به‌کارگیری در سامانه‌های کیفیت‌سنجی برخط را ندارند، ارزیابی غیرمخرب ویژگی سفتی امری لازم به نظر می‌رسد. تاکنون روش‌های غیرمخرب مختلفی از قبیل طیف‌سنجی فلورسانس^۴ (Song et al., 1997)، طیف‌سنجی فرو سرخ نزدیک^۵ (Qing et al., 2007)، طیف‌سنجی ثابت زمانی^۶ (Valero, 2001)، تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر^۷ (Qing et al., 2008)، تصویربرداری چندطیفی^۸ (Peng and Lu, 2006) و تصویربرداری فراطیفی^۹ (Lu et al., 2006; Wang et al., 2012) در ارزیابی سفتی میوه سیب به‌کار برده شده‌اند. با این وجود پژوهش‌های پیش‌تر برای دستیابی به روش‌هایی که از عملکرد بهتری برخوردارند، ادامه دارد.

تصویربرداری بایواسپکل^{۱۰} یا استفاده از تصاویر نقطه‌ای

شاخص کیفی سفتی در میوه سیب اهمیت ویژه‌ای دارد، تاجایی که سیب‌های ترد و سفت نزد مصرف‌کنندگان از مقبولیت بیشتری برخوردار هستند (Peng and Lu, 2006; Harker et al., 2008). سیب از جمله میوه‌هایی است که برای مدت زمان نسبتاً طولانی در شرایط انبارداری نگهداری می‌شود. تغییرات فیزیولوژیکی میوه در طول دوره نگهداری، امری اجتناب‌ناپذیر است که منجر به کاهش سفتی آن خواهد شد. از این‌رو، اندازه‌گیری سفتی سیب امری ضروری است، در غیر این صورت عرضه‌کنندگان میوه توانایی رقابت در بازار را از دست خواهند داد (Lu, 2004; Peng and Lu, 2007). با توجه به

۱- استادیار، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: b.jamshidi@areeo.ac.ir)

۲- دانش‌آموخته دکتری تخصصی، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳- دانشیار، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

DOI: 10.22067/jam.v7i1.49413

4- Florescence spectroscopy
5- Near-infrared spectroscopy
6- Time resolved spectroscopy
7- Laser light backscattering imaging
8- Multispectral imaging
9- Hyperspectral imaging
10- Biospeckle imaging

پژوهش دیگری، تغییرات سفتی سیب در طول دوره عمر قفسه‌ای با روش DSP مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های سیب به مدت ۴ ثانیه در معرض نور لیزر با طول موج ۶۳۵ نانومتر قرار گرفتند و سپس سفتی آن‌ها از طریق آزمون مخرب اندازه‌گیری شد. نتایج حاکی از وجود همبستگی پایین ($r = 0/42$) بین داده‌های مخرب و غیرمخرب اندازه‌گیری شده با روش DSP بود (Adamiak et al., 2012). گزارش دیگری در سال ۲۰۱۲ منتشر شد که حاکی از وجود همبستگی منفی بالا ($r = -0/89$) بین تغییرات سفتی سیب در دوره قبل از برداشت و فعالیت DSP بود (Szymanska-Chargot et al., 2012). با این حال، تاکنون تغییرات سفتی سیب با روش DSP در طول دوره انبارداری طولانی مدت بررسی نشده است. ضمن این‌که، تاکنون هیچ مطالعه‌ای مبنی بر توسعه مدل‌های رگرسیونی به‌منظور پیش‌بینی ویژگی کیفی سفتی میوه سیب با استفاده از روش DSP گزارش نشده است. بنابراین، هدف از این پژوهش بررسی توانایی روش DSP در پیش‌بینی سفتی سیب رقم 'Red Delicious' در طول ۵ ماه انبارداری از طریق توسعه مدل‌های رگرسیونی پیش‌بینی‌کننده است.

مواد و روش‌ها

تهیه نمونه‌های سیب

در مجموع تعداد ۵۴۰ عدد سیب رقم رد دلشس از باغی واقع در شهرستان اشنویه تهیه شد. نمونه‌ها از لحاظ رنگ نسبتاً یکنواخت بودند و با کم‌ترین اثر ناشی از فشار دست برداشت شدند. نمونه‌ها بلافاصله پس از برداشت به سردخانه منتقل شدند و تحت شرایط دمایی 1 ± 0 درجه سلسیوس و شرایط رطوبتی 5 ± 85 درصد نگهداری شدند. با توجه به شرایط معمول انبارداری میوه سیب در استان آذربایجان غربی و به استناد منابع موجود (Peng and Lu, 2007; Wang et al., 2012)، مدت زمان انبارداری برای نمونه‌های سیب ۱۵۰ روز در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها در ۵ مرحله و بر اساس مدت زمان انبارداری انجام گرفت. این مراحل به‌ترتیب در روزهای صفر، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰م انبارداری بود. در هر مرحله از آزمون، نمونه‌های سیب به مدت ۷ تا ۸ ساعت در شرایط دمایی اتاق قرار گرفتند تا به تعادل دمایی برسند. سپس تصاویر DSP در دو طول موج ۶۸۰ و ۷۸۰ نانومتر از هر نمونه تحصیل شد و در نهایت نمونه‌ها مورد آزمون مخرب سفتی قرار گرفتند.

تهیه تصاویر DSP

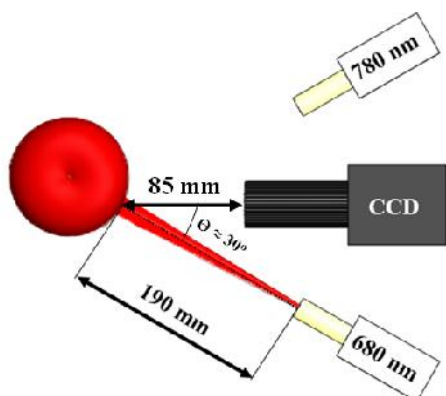
در شکل ۱ طرح‌واره چیدمان تصویربرداری DSP نشان داده شده است. این مجموعه متشکل از یک دوربین CCD (BCP-1050MT, Korea) با محدوده دینامیکی بالا، دارای بازده فوتونی در

دینامیکی^۱ (DSP) از جمله روش‌های غیرمخرب نوین نوری است که در سال‌های اخیر معرفی شده است. در این روش، یک جسم مشخص توسط نور لیزر مورد تابش قرار می‌گیرد و فوتون‌های پس‌پراکنش‌یافته^۲ از آن در طول زمانی معین توسط یک آشکارساز دریافت می‌شود. خروجی آشکارساز، تصاویر نقطه مانندی متشکل از یک سری دانه‌های روشن و تاریک خواهد بود. اگر جسمی که مورد تابش نور لیزر قرار می‌گیرد محصولی غیرزنده باشد، پدیده DSP در طول زمان دارای تغییرات قابل توجهی نخواهد بود و میزان روشنایی یک پیکسل از تصویر در طول زمان ثابت است (Ansari and Nirala, 2013). در این حالت عنوان می‌شود که جسم دارای فعالیت دینامیکی کمی است. از سوی دیگر، فعالیت دینامیکی بالایی برای محصولات که دارای بافتی زنده هستند، انتظار می‌رود. به گونه‌ای که، اگر به سطح جسمی که در معرض نور لیزر قرار گرفته است توجه شود، فعالیت فوتون‌های پس‌پراکنش یافته در طول زمان همچون آب در حال جوش به‌نظر می‌رسد (Rabelo et al., 2005). بنابراین، پدیده DSP در طول زمان دارای تغییرات چشم‌گیری خواهد بود (Briers, 1975). از عوامل اصلی در شکل‌گیری پدیده DSP که موجبات کاربرد آن را در کشاورزی فراهم ساخته است، می‌توان به رشد و تقسیم سلولی، جریان سیتوپلاسمی و سایر واکنش‌های بیوشیمیایی اشاره کرد (Braga et al., 2009). در حوزه کشاورزی-غذایی پژوهش‌های مختلفی از قبیل تشخیص عیوب و بیماری‌ها در میوه‌ها (Adamiak et al., 2012; Pajuelo et al., 2003)، ارزیابی کیفی گوشت (Amaral et al., 2013)، بررسی تغییرات بیوشیمیایی (Zdunek and Cybulska, 2011; Zdunek and Herppich, 2012) و ارزیابی کیفی محصولات در طول دوره عمر قفسه‌ای (Rabelo et al., 2005) با استفاده از روش DSP انجام شده است. گزارش‌هایی مبنی بر کاهش فعالیت DSP در اثر کاهش ملکول‌های نشاسته (Zdunek and Cybulska, 2011) و افزایش فعالیت DSP همزمان با کاهش میزان کلروفیل نیز منتشر شده است (Zdunek and Herppich, 2012).

در یک پژوهش، تغییرات فعالیت DSP برای سه میوه سیب، گلابی و گوجه‌فرنگی در دوره عمر قفسه‌ای (مدت زمان ۶ روز) مورد مطالعه قرار گرفت (Ansari and Nirala, 2013). از یک لیزر با طول موج ۶۳۲/۸ نانومتر و توان ۲ میلی‌وات به‌عنوان منبع نوری استفاده شد. از هریک از نمونه‌ها ۱۵ ثانیه فیلم تهیه شد. همبستگی بین فریم‌های متوالی به‌عنوان ویژگی تصاویر DSP مورد بررسی قرار گرفت. در طول دوره عمر قفسه‌ای نتایج حاکی از کاهش فعالیت DSP و در نتیجه افزایش میزان همبستگی بین فریم‌ها بود. در

- 1- Dynamic speckle pattern (DSP)
- 2- Backscattered photons

پروپ مورد استفاده از نوع استوانه‌ای استیل ضد زنگ با قاعده غیر مسطح و با قطر ۱۱ میلی‌متر بود. پروپ با سرعت ۲ میلی‌متر بر ثانیه تا عمق ۹ میلی‌متری بافت سیب نفوذ کرد و مقدار بیشینه نیرو در طول این فرآیند به‌عنوان شاخص سفتی در نظر گرفته شد. شرایط آزمون سفتی مورد استفاده در این تحقیق برگرفته از منابع انتشار یافته بود (Peng and Lu, 2006).



شکل ۱- طرح‌واره چیدمان تصویربرداری DSP

Fig.1. Schematic of dynamic speckle pattern imaging setup

استخراج ویژگی

در این پژوهش علاوه بر ویژگی‌های مرسوم که تاکنون در تحلیل تصاویر DSP به‌کار گرفته شده‌اند، ویژگی‌های دیگری مبتنی بر تبدیل موجک و بافت نیز مورد بررسی قرار گرفتند.

ویژگی‌های مرسوم در تحلیل تصاویر DSP

تصویربرداری DSP یک روش نوری وابسته به زمان است. مرسوم‌ترین روش پیشنهادی برای بررسی تغییرات نور پس‌پراکنش یافته در طول زمان، تشکیل تصاویر THSP^۱ است. برای این منظور، از هر تصویر تهیه‌شده با رزولوشن $m \times n$ ، تنها یک ستون از پیکسل‌های آن استخراج می‌شود (معمولاً ستونی که در وسط تصویر است). با قرار دادن ستون‌های استخراج‌شده در کنار یکدیگر، در نهایت تصویری شکل می‌گیرد که به تصویر THSP مشهور است (Zdunek et al., 2014). هر سطر از این تصویر حاوی اطلاعاتی درباره تغییرات شدت پیکسل‌ها در طول زمان است. با توجه به این که در پژوهش حاضر تعداد ۵۰۰ فریم تصویر از هر نمونه سیب تهیه شد، تصاویر THSP با اندازه 400×500 تشکیل شدند. در نهایت دو ویژگی آماری مرسوم شامل اینرسی^۲ (IM) و AVD^۳ از تصاویر

ناحیه NIR و مجهز به یک عدد لنز با قابلیت بزرگ‌نمایی بالا (18-120 mm, Avenir CCTV lens, Japan)، هم‌چنین دو عدد لیزر توان پایین (۳ میلی‌وات) در طول موج‌های ۶۸۰ و ۷۸۰ نانومتر بود. انتخاب طول موج‌ها به‌گونه‌ای انجام شد که بیش‌ترین اطلاعات مربوط به ساختار و خواص شیمیایی محصول را در خود داشته باشند. بنابراین و با توجه به این که جذب کلروفیل در نزدیکی طول موج ۶۸۰ نانومتر اتفاق می‌افتد و تغییر در مقدار آن می‌تواند بر ویژگی‌های کیفی میوه تأثیرگذار باشد، این طول موج برای یکی از لیزرها انتخاب شد. هم‌چنین، از یک لیزر ۷۸۰ نانومتر به‌عنوان طول موج ابتدای ناحیه فرورسرخ (NIR) به‌منظور دستیابی به اطلاعات جذبی پیوندهای O-H، C-H، H-N که در ترکیبات شیمیایی میوه به‌وفور یافت می‌شوند و بر ویژگی‌های کیفی آن تأثیرگذارند، استفاده شد (Jamshidi et al., 2014). چیدمان مجموعه تصویربرداری DSP به گونه‌ای طراحی شد که نور لیزر در فاصله ۱۹۰ میلی‌متری و با زاویه تقریبی ۳۰ درجه نسبت به دوربین به نمونه وارد شود. در این زاویه احتمال تشخیص فوتون‌های برگشتی از سطح میوه توسط دوربین کاهش پیدا کرده و فوتون‌های دریافتی مربوط به پس‌پراکنش داخلی خواهند بود (Zdunek et al., 2007). در این چیدمان، دوربین نیز عمود بر نقطه برخورد نور به نمونه و در فاصله ۸۵ میلی‌متری قرار داده شد. انتخاب فاصله‌ها به‌گونه‌ای بود که بهترین تصویر حاصل گردد. معیار قابل قبول بودن تصاویر نیز مشاهده فعالیت DSP در تصویر، پایین بودن پدیده فلورسانس و پوشش نسبتاً کامل تصویر توسط پیکسل‌های با اندازه درشت بود. مجموعه تصویربرداری در یک محفظه تاریک به‌منظور حذف اثر نور محیط قرار داده شد.

به‌منظور تهیه تصاویر DSP، ابتدا نمونه‌ها به‌ترتیب شماره‌گذاری شدند. سپس هریک از نمونه‌ها به داخل محفظه تصویربرداری منتقل و در محل مورد نظر قرار داده شدند. هر نمونه ابتدا در معرض نور لیزر ۶۸۰ نانومتر قرار گرفت و تصویربرداری از سطح آن به مدت ۲۵ ثانیه انجام شد. پس از تحصیل ۵۰۰ فریم تصویر با رزولوشن 480×720 پیکسل، لیزر ۶۸۰ نانومتر خاموش و تصویربرداری با لیزر ۷۸۰ نانومتر انجام گرفت. برای طول موج ۷۸۰ نانومتر نیز ۵۰۰ فریم تصویر تهیه شد. لازم به ذکر است که تحصیل تصاویر با استفاده از نرم‌افزار مهندسی MATLAB 2012b انجام شد.

آزمون مخرب سفتی

پس از تهیه تصاویر DSP، نمونه‌ها مورد آزمون مخرب سفتی قرار گرفتند. برای تعیین سفتی نمونه‌های سیب از دستگاه سنجش بافت Texture Analyzer مدل TA-XTPlus استفاده شد. پس از آن که پوست سیب درست از محل برخورد نور لیزر (روی خط مرکزی سیب) برداشته شد، نمونه‌ها مورد آزمون نفوذ تک‌محوری قرار گرفتند.

- 1- Time historical speckle pattern
- 2- Inertia moment
- 3- Absolute value of the differences

THSP استخراج شد. که در آن، W ضرایب موجک، $f(x,y)$ تصویر ورودی، تابع موجک، z پارامتر انتقال، m و n اندازه تصویر هستند.

در پژوهش حاضر، هر تصویر THSP تا سه سطح تحت تابع موجک از نوع دابوچی^۳ (Db4) تجزیه شد (شکل ۳). انرژی (E) (رابطه ۶) و آنتروپی (S) (رابطه ۷) به‌عنوان دو ویژگی مؤثر در تبدیل گسسته موجک برای تمامی سطح‌های تصویر استخراج شد (Borah et al., 2007). به این ترتیب، مجموعاً برای هر تصویر THSP، ۲۴ ویژگی موجک استخراج شد.

$$E = \frac{1}{(XY)^2} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y |W(x,y)|^2 \quad (۶)$$

$$S = -\frac{1}{(XY)^2} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y |W(x,y)|^2 \log |W(x,y)|^2 \quad (۷)$$

آنالیز بافت

ویژگی‌های بافت بیانگر چگونگی توزیع سطح خاکستری پیکسل‌ها در یک تصویر هستند. با توجه به ظاهر و الگوی خاص تصاویر THSP تصمیم گرفته شد تا ویژگی‌های بافت در تحلیل تصاویر THSP نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. ممان اول تا سوم، همواری، یکنواختی، و آنتروپی^۴ به‌عنوان شش ویژگی مؤثر از هیستوگرام نرمال شده تصاویر THSP استخراج شد (جدول ۱).

تدوین مدل‌های واسنجی

تدوین مدل واسنجی مناسب برای تخمین ویژگی کیفی مورد نظر، آخرین مرحله‌ای بود که پس از استخراج ویژگی‌ها از تصاویر انجام گرفت. مدل‌های واسنجی را می‌توان به دو دسته خطی و غیرخطی تقسیم‌بندی نمود. به‌دلیل وجود عوامل اجتناب‌ناپذیر و ناخواسته‌ای همچون متفاوت بودن اندازه میوه‌ها، تغییرات دمایی محل آزمایش و خطاهایی که ممکن است در حین تصویربرداری رخ دهد، استفاده از مدل‌های غیرخطی نسبت به مدل‌های خطی از ارجحیت بیشتری برخوردار است (Mollazade, 2013). بنابراین در این پژوهش، از شبکه‌های عصبی مصنوعی^۵ (ANN) با یک لایه مخفی برای تدوین مدل‌های رگرسیونی غیرخطی به‌منظور پیش‌بینی ویژگی سفتی سیب استفاده شد. در این راستا و برای یافتن تعداد بهینه نرون‌ها، تعداد مختلفی از نرون‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. در نرون‌های لایه مخفی از تابع تانژانت سیگموید^۶ و در نرون لایه خروجی از تابع خطی استفاده شد.

استخراج ویژگی ممان اینرسی (IM) از تصاویر THSP:

یکی از روش‌های قوی و معمول در بررسی تصاویر THSP، تشکیل ماتریس هم‌وقوعی^۱ است. تعریف ماتریس هم‌وقوعی به‌صورت رابطه (۱) است (Alves Braga Junior et al., 2007).

$$COM = [N_{ij}] \quad (۱)$$

که در آن، N تعداد دفعاتی است که در تصویر THSP پیکسل با شدت خاکستری z بلافاصله بعد از پیکسل با شدت خاکستری i اتفاق می‌افتد.

برای اندازه‌گیری پراکندگی آرایه‌های ماتریس هم‌وقوعی حول قطر اصلی، از رابطه (۲) استفاده می‌شود که ویژگی ممان اینرسی (IM) نامیده می‌شود (Alves Braga Junior et al., 2007).

$$IM = \sum_{ij} M_{ij} (i - j)^2 \quad (۲)$$

در رابطه (۲)، متغیر M ، ماتریس هم‌وقوعی نرمال شده است که به‌صورت رابطه (۳) بیان می‌شود (Arizaga et al., 1999).

$$M_{ij} = \frac{N_{ij}}{\sum_j N_{ij}} \quad (۳)$$

ویژگی AVD:

برای اندازه‌گیری پراکندگی آرایه‌های ماتریس هم‌وقوعی حول قطر اصلی آن، تغییراتی در رابطه (۲) انجام شده است که به‌عنوان روشی جایگزین برای ویژگی IM معرفی شده است (رابطه (۴)). زمانی که سطح فعالیت DSP متوسط باشد این ویژگی می‌تواند مؤثرتر از ویژگی IM باشد (Braga et al., 2011).

$$AVD = \sum_{ij} M_{ij} \times |i - j| \quad (۴)$$

تبدیل موجک^۲

در سال‌های اخیر تبدیل موجک به‌عنوان یک ابزار قوی در پردازش سیگنال و تصویر محبوبیت رو به رشدی را به‌دست آورده است. تبدیل موجک بر خلاف تبدیل فوریه اطلاعات زمانی سیگنال مورد نظر را حفظ کرده و در تحلیل سیگنال‌های ناپایستا بسیار بهتر عمل می‌کند (Nobre et al., 2009). با توجه به این‌که فعالیت DSP نمی‌تواند شرایط ایستایی یک سیگنال را اقلان کند، کاربرد تبدیل موجک منطقی‌تر از تبدیل فوریه به‌نظر می‌رسد (Braga et al., 2011).

تبدیل موجک مجزا را می‌توان به‌صورت رابطه (۵) تعریف کرد (Gonzalez and Woods, 2002).

$$W(j,m,n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) \mathbb{E}_{j,m,n}(x,y) \quad (۵)$$

3- Daubechies

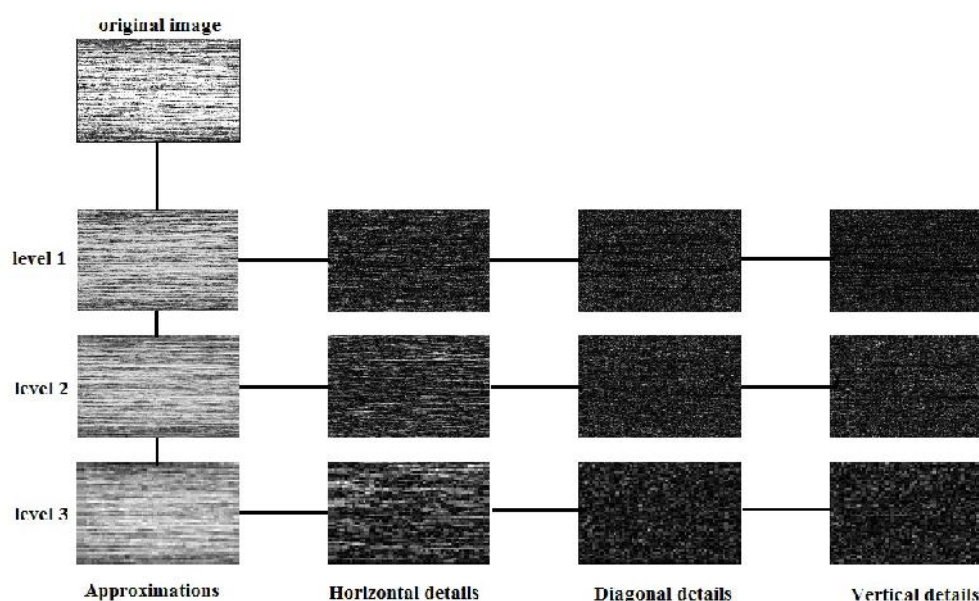
3- Entropy

5- Artificial neural networks

6- Tangent sigmoid

1- Co-occurrence matrix

2- Wavelet transform



شکل ۲- تجزیه تصویر THSP تا سطح سه توسط تبدیل موجک

Fig.2. Decomposition of THSP image into three levels by wavelet transform

جدول ۱- ویژگی‌های بافت (Gonzalez and Woods, 2002)

Table 1- Texture features (Gonzalez and Woods, 2002)

| توضیح ویژگی Feature description | معادله ویژگی Feature equation |
|------------------------------------|---|
| ممان اول The first moment | $\sim = \sum_{i=0}^{L-1} z_i p(z_i)$ |
| ممان دوم The second moment | $\dagger = \sqrt{\sum_{i=0}^{L-1} (z_i - \sim)^2 p(z_i)}$ |
| ممان سوم The third moment | $\sum_{i=0}^{L-1} (z_i - \sim)^3 p(z_i)$ |
| همواری Smoothness | $R = 1 - \frac{1}{1 + \dagger^2}$ |
| یکنواختی Uniformity | $\sum_{i=0}^{L-1} p^2(z_i)$ |
| آنترپی Entropy | $-\sum_{i=0}^{L-1} p(z_i) \log_2 p(z_i)$ |

که z_i شدت سطح خاکستری، $p(z_i)$ هیستوگرام نرمال شده و L تعداد سطوح خاکستری هستند.

Where z_i is a random intensity, $p(z_i)$ is the normalized histogram, and L is number of intensity levels.

در مجموع، تعداد ۳۲ ویژگی شامل AVD، IM، AVD، ۲۴ ویژگی مبتنی بر تبدیل موجک و ۶ ویژگی مبتنی بر بافت از هر تصویر THSP استخراج شد.

شد. ارزیابی عملکرد شبکه نیز از طریق بررسی پارامترهای ضریب همبستگی (r)، هم‌چنین خطای استاندارد (SE) (روابط (۸) و (۹)) انجام شد (Romano et al., 2011).

بعد از پیاده‌سازی شبکه در نرم‌افزار MATLAB، از ۶۰ درصد داده‌ها برای آموزش، ۱۵ درصد برای اعتبارسنجی متقاطع مدل واسنجی و از ۲۵ درصد باقی‌مانده داده‌ها برای آزمون شبکه استفاده

نتایج و بحث

بررسی تغییرات ویژگی کیفی سفتی در طول دوره انبارداری

مقادیر آماری مربوط به شاخص سفتی سیب در طول ۵ دوره آزمایش در جدول ۲ آورده شده است. نتایج بیانگر کاهش معنی‌دار شاخص سفتی سیب در طول دوره انبارداری بود. مقدار میانگین سفتی برای نمونه‌های سیب در روز صفرم انبارداری ۸۲/۸۳ نیوتن به‌دست آمد که این مقدار پس از ۵ ماه انبارداری به ۴۸/۰۵ نیوتن کاهش پیدا کرد.

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - m_i - bias)^2}{n-1}} \quad (8)$$

$$bias = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - m_i)}{n} \quad (9)$$

در این روابط، p و m به ترتیب مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده هستند و n بیانگر تعداد نمونه‌ها است. لازم به ذکر است که هرکدام از ساختارهای مختلف شبکه برای ۲۰ بار اجرا و میانگین مقادیر ضریب همبستگی و استاندارد خطا به‌دست آمده در ۲۰ تکرار به‌عنوان عملکرد نهایی هر شبکه در نظر گرفته شد.

جدول ۲- مقادیر آماری مربوط به سفتی و جرم سیب‌ها

Table 2- Statistical values of firmness and mass for apples

| | زمان انبارداری (روز) | کمینه | بیشینه | میانگین | انحراف استاندارد |
|------------------------------|----------------------|--------|--------|---------------------|------------------|
| | Storage day | Min | Max | Mean | SD |
| سفتی (نیوتن) Firmness (N) | 0 | 60.83 | 103.06 | 82.83 ^a | 7.69 |
| | 30 | 50.52 | 88.29 | 70.28 ^b | 7.85 |
| | 60 | 48.40 | 87.92 | 66.46 ^c | 7.36 |
| | 120 | 33.43 | 74.12 | 54.76 ^d | 7.69 |
| | 150 | 29.53 | 80.92 | 48.05 ^e | 6.88 |
| | Total of samples | 29.53 | 103.06 | 63.54 | 14.29 |
| جرم (گرم) Mass (g) | 0 | 88.40 | 220 | 151.40 ^a | 25.44 |
| | 30 | 102.80 | 214 | 149.98 ^a | 23.31 |
| | 60 | 95.60 | 215 | 144.66 ^a | 24.39 |
| | 120 | 100.60 | 218.20 | 146.74 ^a | 23.48 |
| | 150 | 97 | 215.20 | 147.73 ^a | 24.45 |
| | Total of samples | 88.40 | 220 | 148.07 | 24.24 |

اعداد دارای حروف غیر مشابه بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند.
Different letters denote significant differences ($p < 0.05$) among the mean values.

برخوردار بوده است.

در جدول ۳ تغییرات ویژگی IM در طول دوره انبارداری میوه سیب نشان داده شده است. توضیح این جدول در ادامه و در دو بند جداگانه (الف و ب) بیان شده است.

الف) دوره نگهداری تا روز ۶۰ام انبارداری

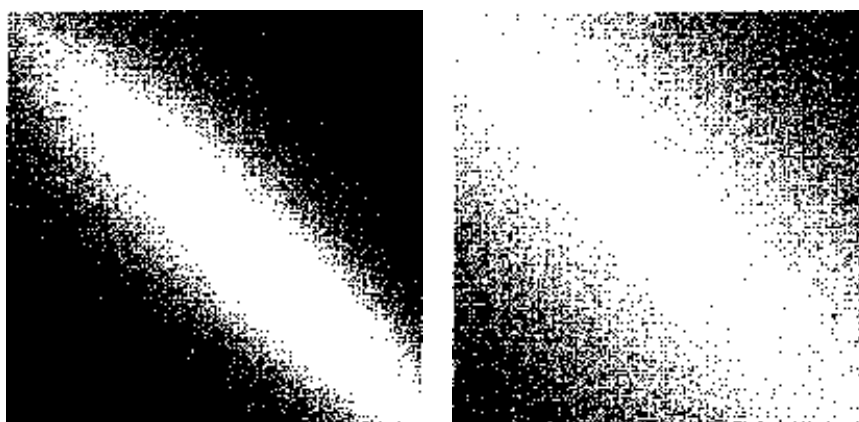
در این دوره یک رابطه معکوس بین میزان فعالیت DSP و شاخص سفتی مشاهده شد. یعنی با کاهش میزان سفتی، میزان فعالیت DSP افزایش پیدا کرد (جدول ۳). میزان فعالیت DSP در روز صفرم انبارداری دارای کمترین مقدار ممکن بود و پس از آن و در روز ۳۰ام یک افزایش سریع در فعالیت DSP اتفاق افتاد. افزایش فعالیت DSP تا روز ۶۰ام از مرحله انبارداری ادامه پیدا کرد، هرچند از سرعت تغییرات تا حد زیادی کاسته شد. وجود رابطه معکوس بین فعالیت DSP و شاخص سفتی حاکی از وجود کلروفیل است. پیش از این نیز گزارش‌هایی مبنی بر وجود رابطه‌ای معکوس بین میزان کلروفیل و

همان‌گونه که از جدول ۲ قابل مشاهده است، مقدار میانگین سفتی اندازه‌گیری شده در هر دوره از آزمایش دارای اختلاف معنی‌داری (در سطح احتمال ۵ درصد) با سایر دوره‌های آزمایش است. این نتیجه می‌تواند حاکی از فعالیت فیزیولوژیکی بالا در میوه سیب باشد. از سوی دیگر، سیب‌های مورد استفاده محدوداً نسبتاً وسیعی از مقادیر سفتی را در بر داشتند که برای تدوین مدل واسنجی قابل اعتماد مفید بود.

بررسی تغییرات فعالیت DSP در طول دوره انبارداری

بررسی فعالیت DSP به‌طور معمول از طریق تشکیل ماتریس هم‌وقوعی و محاسبه ویژگی IM انجام می‌شود. نتایج نشان داد که تعداد پیکسل‌های غیر صفر پراکنده شده در اطراف قطر اصلی ماتریس هم‌وقوعی و در نتیجه مقدار ویژگی IM برای طول موج ۶۸۰ نانومتر بیش از طول موج ۷۸۰ نانومتر است (شکل ۳). این بدان معنی است که در طول موج ۶۸۰ نانومتر، پدیده DSP از فعالیت بیش‌تری

(Herppich, 2012).

فعالیت DSP در محدوده طول موج‌های قرمز ناحیه بینایی منتشر شده است (Szymanska-Chargot *et al.*, 2012; Zdunek and

شکل ۳- نمونه‌ای از ماتریس هم‌وقوعی حاصل از طول موج ۶۸۰ نانومتر (سمت راست) و طول موج ۷۸۰ نانومتر (سمت چپ)
Fig. 3. Typical Co-occurrence Matrix obtained from wavelength of 680nm (Right), and 780nm (Left)

جدول ۳- مقادیر متوسط ممان اینرسی و شدت نور پس‌پراکنش یافته برای سیب‌ها در طول دوره انبارداری

Table 3- Mean values of inertia moment (IM) and backscattered intensity measured for apples during cold storage

| | زمان انبارداری (روز) Storage days | 680 nm | | 780 nm | |
|---|--------------------------------------|---------------------|------|---------------------|------|
| | | Mean | SD | Mean | SD |
| ممان اینرسی ($\times 10^4$) Inertia moment ($\times 10^4$) | 0 | 23.30 ^e | 2.84 | 3.21 ^c | 1.60 |
| | 30 | 44.20 ^b | 5.97 | 7.44 ^{ab} | 1.52 |
| | 60 | 48.03 ^a | 4.64 | 8.99 ^a | 1.79 |
| | 120 | 34.03 ^d | 5.02 | 6.56 ^b | 1.47 |
| | 150 | 37.32 ^c | 4.01 | 8.68 ^a | 1.80 |
| شدت نور پس‌پراکنش یافته Backscattered intensity | 0 | 140.90 ^d | 4.61 | 187.76 ^c | 5.96 |
| | 30 | 153.50 ^c | 3.78 | 198.70 ^b | 3.99 |
| | 60 | 154.07 ^c | 3.17 | 197.02 ^b | 3.69 |
| | 120 | 160.38 ^a | 3.92 | 202.96 ^a | 2.78 |
| | 150 | 155.71 ^b | 3.49 | 198.82 ^b | 3.89 |

اعداد دارای حروف غیر مشابه بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند.
 Different letters denote significant differences ($p < 0.05$) among the mean values.

موج ۶۸۰ نانومتر به دلیل این که جذب کلروفیل در نزدیکی این طول موج اتفاق می‌افتد به شدت و تصاویر تهیه شده در طول موج ۷۸۰ نانومتر به میزان کمتری تحت تأثیر مقدار کلروفیل در میوه هستند.

ب) دوره نگهداری بعد از روز ۶۰ انبارداری

در این دوره زمانی، کاهش معنی‌داری در فعالیت DSP اتفاق افتاد (جدول ۳). علت اصلی کاهش فعالیت DSP در این دوره به تغییرات فیزیولوژیکی بر می‌گردد که در میوه سیب اتفاق می‌افتد. میوه‌ها حاوی مقدار فراوانی نشاسته ($C_6H_{12}O_5$) با اندازه‌های نسبی ۱ تا ۱۰۰ میکرون و همچنین پکتین، اسیدهای آلی و اسیدهای آمینه هستند. در طول فرآیند رسیدگی، نشاسته و اسیدهای آمینه هیدرولیز شده و تبدیل به کربوهیدرات‌های ساده‌تری همچون گلوکز ($C_6H_{12}O_6$)

در گزارش‌های مذکور، کلروفیل به‌عنوان یک ماسک معرفی شده است که فعالیت DSP را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. به‌گونه‌ای که با کاهش میزان کلروفیل، تعداد ملکول‌هایی که در فرآیند پس‌پراکنش نور به‌عنوان مراکز پخش‌کننده عمل می‌کنند، افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه یک افزایش نسبی در فعالیت DSP اتفاق می‌افتد. وجود کلروفیل را می‌توان از طریق اندازه‌گیری میزان شدت نور پس‌پراکنش یافته اثبات کرد، زیرا بین میزان کلروفیل و شدت نور پس‌پراکنش یافته ارتباط مستقیم وجود دارد (Szymanska-Chargot *et al.*, 2012). نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر حاکی از افزایش معنی‌دار میزان شدت نور پس‌پراکنش یافته در طول ۶۰ روز اول از دوره انبارداری بود (جدول ۳) که بیانگر کاهش میزان کلروفیل در طول این دوره است. از سوی دیگر، می‌توان نتیجه گرفت که تصاویر تهیه شده در طول

در این پژوهش، نتایج حاصل از روش آزمون و خطا نشان داد که شبکه‌ای با یک لایه مخفی و حداکثر دفعات آموزش برابر با ۱۰۰۰۰، می‌تواند در پیش‌گویی پارامتر سفتی سیب به‌خوبی عمل نماید. تعیین تعداد نرون‌ها به‌عنوان فاکتور مهم دیگری در آموزش شبکه نیز از طریق روش آزمون و خطا انجام گرفت (جدول ۴). ساختارهایی که عملکرد بهتری در پیش‌بینی سفتی داشتند در این جدول به‌صورت پررنگ نمایش داده شده‌اند.

نتایج به‌دست آمده در این پژوهش زمانی جذاب‌تر خواهد بود که با نتایج به‌دست آمده از پژوهش‌های دیگر مقایسه شود. محققان با استفاده تصویربرداری چندطیفی و فراطیفی به‌عنوان روش‌های نوری گران قیمت توانسته‌اند، در تخمین پارامتر سفتی سیب به ضرایب همبستگی از ۰/۷۴ تا ۰/۸۹ و خطای استاندارد از ۶ تا ۸/۷ نیوتن دستیابی پیدا کنند (Lu, 2007; Mendoza et al., 2011; Peng and Lu, 2005, 2006). اگرچه نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نتوانست به‌خوبی نتایج پژوهش‌های دیگر باشد، اما تفاوت زیادی نیز بین آن‌ها وجود نداشت. بنابراین می‌توان ادعا کرد که روش DSP به‌عنوان یک روش غیرمخرب ارزان قیمت در تخمین پارامتر سفتی می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های پرهزینه‌ای همچون تصویربرداری چندطیفی و فراطیفی باشد.

می‌شوند (Szymanska-Chargot et al., 2012). پژوهش‌های پیشین نشان داده است که دانه‌های نشاسته یکی از عوامل اصلی در پدیده DSP به‌شمار می‌روند و کاهش این ملکول‌ها تأثیر قابل‌توجهی در کاهش میزان فعالیت DSP دارد (Adamiak et al., 2012; Ansari and Nirala, 2013; Szymanska-Chargot et al., 2012). بنابراین می‌توان کاهش دانه‌های نشاسته را عامل اصلی کاهش فعالیت DSP در دوره نگهداری بعد از ۶۰ روز در هر دو طول موج بیان کرد.

ارائه بهترین مدل پیش‌بینی‌کننده سفتی سیب

پارامترهایی همچون دفعات آموزش، تعداد لایه‌های مخفی و تعداد نرون‌ها نقش اصلی در یادگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی ایفا می‌کنند (Lu, 2007). اگر دفعات آموزش، تعداد لایه‌های مخفی و نرون‌ها بیش از حد مجاز باشد، پدیده بیش‌آموزش اتفاق می‌افتد. از طرف دیگر، پایین بودن پارامترهای مذکور می‌تواند موجب شود تا شبکه به‌خوبی آموزش نبیند. در هر دو حالت بیش‌آموزش و کم‌آموزش، شبکه قادر نخواهد بود در مسایل پیش‌گویی و یا طبقه‌بندی به‌خوبی عمل نماید (Mollazade, 2013). یکی از روش‌های مرسوم برای تعیین پارامترهای بهینه، روش آزمون و خطا است.

جدول ۴- نتایج پیش‌بینی مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی برای ویژگی سفتی سیب
Table 4- Prediction results of ANN models for apple firmness attribute

| تعداد نرون‌ها No. of neurons | 680 nm | | 780 nm | |
|---------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| | $r_c/r_{cv}/r_p$ | $SE_c/SE_{cv}/SE_p(N)$ | $r_c/r_{cv}/r_p$ | $SE_c/SE_{cv}/SE_p(N)$ |
| 7 | 0.82/0.81/0.80 | 8.1/8.4/8.5 | 0.84/0.81/0.81 | 7.9/8.3/8.2 |
| 9 | 0.83/0.80/0.81 | 8/8.6/8.4 | 0.84/0.82/0.80 | 7.7/8.3/8.4 |
| 11 | 0.82/0.79/0.80 | 8.1/8.6/8.5 | 0.85/0.82/0.81 | 7.6/8.3/8.5 |
| 13 | 0.82/0.82/0.78 | 8.2/8.2/8.8 | 0.85/0.82/0.80 | 7.6/8.3/8.6 |
| 15 | 0.82/0.80/0.78 | 8.1/8.6/8.9 | 0.84/0.82/0.80 | 7.7/8.2/8.5 |
| 17 | 0.83/0.80/0.81 | 8/8.6/8.4 | 0.84/0.82/0.81 | 7.7/8.1/8.4 |
| 19 | 0.83/0.81/0.79 | 7.9/8.5/8.5 | 0.85/0.82/0.82 | 7.5/8.1/8.4 |
| 21 | 0.82/0.80/0.81 | 8.1/8.5/8.4 | 0.85/0.82/0.81 | 7.6/8.3/8.5 |
| 23 | 0.83/0.79/0.79 | 8/8.6/8.7 | 0.85/0.82/0.82 | 7.5/8.3/8.2 |
| 25 | 0.83/0.82/0.79 | 8/8.3/8.6 | 0.85/0.82/0.82 | 7.6/8/8.3 |
| 27 | 0.83/0.81/0.79 | 8/8.2/8.5 | 0.86/0.82/0.82 | 7.4/8.3/8.1 |
| 29 | 0.83/0.80/0.78 | 7.9/8.5/9 | 0.85/0.82/0.82 | 7.6/8/8.2 |
| 31 | 0.83/0.81/0.79 | 7.9/8.5/8.6 | 0.85/0.82/0.81 | 7.5/8.3/8.5 |
| 33 | 0.82/0.79/0.79 | 8.1/8.4/8.8 | 0.85/0.83/0.81 | 7.5/8/8.5 |
| 35 | 0.79/0.77/0.74 | 8.2/8.6/9 | 0.85/0.82/0.82 | 7.5/8.3/8.2 |
| 37 | 0.83/0.79/0.79 | 7.9/8.7/8.8 | 0.85/0.81/0.81 | 7.5/8.2/8.5 |
| 39 | 0.82/0.81/0.81 | 8/8.5/8.4 | 0.85/0.82/0.80 | 7.5/8/8.4 |
| 41 | 0.82/0.81/0.80 | 8.2/8.3/8.4 | 0.85/0.83/0.81 | 7.5/8.2/8.4 |
| 43 | 0.82/0.81/0.81 | 8.1/8.4/8.4 | 0.84/0.82/0.80 | 7.6/8.1/8.7 |
| 45 | 0.83/0.81/0.79 | 7.9/8.5/8.7 | 0.85/0.83/0.83 | 7.4/8.1/8.2 |
| 47 | 0.83/0.81/0.80 | 7.9/8.3/8.5 | 0.85/0.82/0.80 | 7.5/8.3/8.4 |

r_c ، r_{cv} و r_p به ترتیب ضرایب همبستگی برای آموزش، اعتبارسنجی متقاطع و پیش‌بینی هستند. SE_c ، SE_{cv} و SE_p به ترتیب متوسط خطای استاندارد برای آموزش، اعتبارسنجی متقاطع و پیش‌بینی هستند.

r_c ، r_{cv} ، and r_p are correlation coefficient for training, cross-validation and prediction, respectively. SE_c ، SE_{cv} ، and SE_p are mean standard error for training, cross-validation and prediction, respectively.

نتیجه‌گیری

سفتی سیب‌ها را با ضریب همبستگی بیش از ۰/۸۰ در هر دو طول موج ۶۸۰ و ۷۸۰ نانومتر داشتند. بنابراین، روش DSP می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های پر هزینه تصویربرداری چندطیفی و فراطیفی به‌منظور تخمین غیر مخرب پارامتر سفتی میوه سیب باشد. با این وجود مطالعات بیشتری در این زمینه مورد نیاز است تا بتوان عملکرد آن را ارتقاء و زمان لازم برای تصویربرداری را کاهش داد.

در این پژوهش، توانایی روش DSP در ترکیب با مدل‌سازی غیرخطی شبکه عصبی مصنوعی به‌منظور پیش‌بینی غیر مخرب سفتی سیب رقم ردلیشس مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج پژوهش حاکی از عملکرد قابل قبول این روش در پیش‌بینی ویژگی سفتی میوه بود. به‌گونه‌ای که، بهترین مدل‌های ANN تدوین شده توانایی پیش‌بینی

References

1. Adamiak, A., A. Zdunek, A. Kurenda, and K. Rutkowski. 2012. Application of the biospeckle method for monitoring bull's eye rot development and quality changes of apples subjected to various storage methods-preliminary studies. *Sensors* 12: 3215-3227.
2. Alves Braga Junior, R., B. Oliveira Silva, G. Rabelo, R. Marques Costa, A. Machado Enes, N. Cap, H. Rabal, R. Arizaga, M. Trivi, and G. Horgan. 2007. Reliability of biospeckle image analysis. *Optics and Lasers in Engineering* 45: 390-395.
3. Amaral, I. C., R. A. Braga Jr, E. M. Ramos, A. L. S. Ramos, and E. A. R. Roxael. 2013. Application of biospeckle laser technique for determining biological phenomena related to beef aging. *Journal of Food Engineering* 119: 135-139.
4. Ansari, M. D., and A. K. Nirala. 2013. Biospeckle activity measurement of Indian fruits using the methods of cross-correlation and inertia moments. *Optik* 124: 2180-2186.
5. Arizaga, R., M. Trivi, and H. Rabal. 1999. Speckle time evolution characterization by the co-occurrence matrix analysis. *Optics and Laser Technology* 31: 163-169.
6. Borah, S., E. L. Hines, and M. Bhuyan. 2007. Wavelet transform based image texture analysis for size estimation applied to the sorting of tea granules. *Journal of Food Engineering* 79: 629-639.
7. Braga, R. A., C. M. B. Nobre, A. G. Costa, T. Sáfyadi, and F. M. Da Costa. 2011. Evaluation of activity through dynamic laser speckle using the absolute value of the differences. *Optics Communications* 284: 646-650.
8. Braga, R. A., L. Dupuy, M. Pasqual, and R. R. Cardoso. 2009. Live biospeckle laser imaging of root tissues. *European Biophysics Journal* 38: 679-686.
9. Briers, J. D. 1975. Wavelength dependence of intensity fluctuations in laser speckle patterns from biological specimens. *Optics Communications* 13: 324-326.
10. Gonzalez, R. C., and R. E. Woods. 2002. *Digital Image Processing*. Second Ed. Prentice Hall, New Jersey.
11. Harker, F. R., E. M. Kupferman, A. B. Marin, F. A. Gunson, and C. M. Triggs. 2008. Eating quality standards for apples based on consumer preferences. *Postharvest Biology and Technology* 50: 70-78.
12. Jamshidi, B., S. Minaei, E. Mohajerani, and H. Ghassemian. 2014. Prediction of soluble solids in oranges using visible/near-infrared spectroscopy: Effect of peel. *International Journal of Food Properties* 17: 1460-1468.
13. Lu, R. 2007. Nondestructive measurement of firmness and soluble solids content for apple fruit using hyperspectral scattering images. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety* 1: 19-27.
14. Lu, R. 2004. Multispectral imaging for predicting firmness and soluble solids content of apple fruit. *Postharvest Biology and Technology* 31: 147-157.
15. Lu, R., J. Qin, and Y. Peng. 2006. Measurement of the optical properties of apples by hyperspectral imaging for assessing fruit quality. *ASAE Annual International Meeting, USA*.
16. Mendoza, F., R. Lu, D. Ariana, H. Cen, and B. Bailey. 2011. Integrated spectral and image analysis of hyperspectral scattering data for prediction of apple fruit firmness and soluble solids content. *Postharvest Biology and Technology* 62: 149-160.
17. Mollazade, K. 2013. Non-destructive evaluation of some greenhouse products during sorting process using laser-light backscattering imaging and ANFIS. Ph.D. Thesis. University of Tehran. (In Farsi).

18. Nobre, C. M. B., R. A. Braga Jr, A. G. Costa, R. R. Cardoso, W. S. da Silva, and T. Sáfyadi. 2009. Biospeckle laser spectral analysis under inertia moment, entropy and cross-spectrum methods. *Optics Communications* 282: 2236-2242.
19. Pajuelo, M., G. Baldwin, H. Rabal, N. Cap, R. Arizaga, and M. Trivi. 2003. Bio-speckle assessment of bruising in fruits. *Optics and Lasers in Engineering* 40: 13-24.
20. Peng, Y., and R. Lu. 2005. Modeling multispectral scattering profiles for prediction of apple fruit firmness. *Transactions of the ASAE* 48 (1): 235-242.
21. Peng, Y., and R. Lu. 2006. Improving apple fruit firmness predictions by effective correction of multispectral scattering images. *Postharvest Biology and Technology* 41: 266-274.
22. Peng, Y. and R. Lu. 2007. Prediction of apple fruit firmness and soluble solids content using characteristics of multispectral scattering images. *Journal of Food Engineering* 82: 142-152.
23. Qing, Z., B. Ji, and M. Zude. 2007. Wavelength selection for predicting physicochemical properties of apple fruit based on near-infrared spectroscopy. *Journal of Food Quality* 30: 511-526.
24. Qing, Z., B. Ji, and M. Zude. 2008. Non-destructive analyses of apple quality parameters by means of laser-induced light backscattering imaging. *Postharvest Biology and Technology* 48: 215-222.
25. Rabelo, G. F., R. A. Braga Júnior, and I. Fabbro. 2005. Laser speckle techniques in quality evaluation of orange fruits. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 9: 570-575.
26. Romano, G., M. Nagle, D. Argyropoulos, and J. Müller. 2011. Laser light backscattering to monitor moisture content, soluble solid content and hardness of apple tissue during drying. *Journal of Food Engineering* 104: 657-662.
27. Song, J., W. Deng, R. M. Beaudry, and P. R. Armstrong. 1997. Changes in chlorophyll fluorescence of apple fruit during maturation, ripening, and senescence. *HortScience* 32: 891-896.
28. Szymanska-Chargot, M., A. Adamiak, and A. Zdunek. 2012. Pre-harvest monitoring of apple fruits development with the use of biospeckle method. *Scientia Horticulture* 145: 23-28.
29. Valero, C. 2001. Aplicación de la espectroscopía láser de reflectancia difusa (ERDT) a la medida de calidad interna de frutas y hortalizas. Doctoral Thesis. Universidad Politécnica de Madrid.
30. Wang, S., M. Huang. and Q. Zhu. 2012. Model fusion for prediction of apple firmness using hyperspectral scattering image. *Computers and Electronics in Agriculture* 80: 1-7.
31. Zdunek, A., and J. Cybulska. 2011. Relation of biospeckle activity with quality attributes of apples. *Sensors* 11: 6317-6327.
32. Zdunek, A., and W. B. Herppich. 2012. Relation of biospeckle activity with chlorophyll content in apples. *Postharvest Biology and Technology* 64: 58-63.
33. Zdunek, A., A. Adamiak, P. M. Pieczywek, and A. Kurenda. 2014. The biospeckle method for the investigation of agricultural crops: A review. *Optics and Lasers in Engineering* 52: 276-285.
34. Zdunek, A., L. Muravsky, L. Frankevych, and K. Konstankiewicz. 2007. New nondestructive method based on spatial-temporal speckle correlation technique for evaluation of apples quality during shelf-life. *International Agrophysics* 21: 305-310.



Non-destructive prediction of apple firmness during storage based on dynamic speckle patterns

B. Jamshidi^{1*} - A. Arefi² - S. Minaei³

Received: 28-08-2015

Accepted: 14-11-2015

Introduction

In recent years, the determination of firmness as an important quality attribute of apple fruits has been widely noticed. Common methods for firmness measurement are destructive and cannot be applied in sorting lines. Therefore, development of a non-destructive, simple, fast, and the low-cost determination technique of firmness is imperative. Dynamic speckle patterns (DSP) or bio speckle imaging as a new optical technique has been recently noticed for non-destructive quality assessment of food and agricultural products. In this research, the feasibility of using this technique was investigated for non-destructive prediction of firmness in intact apples during five months of cold storage.

Materials and Methods

During the harvest season, in 2013, a total of 540 'Red Delicious' apples were obtained from a local orchard in Oshnaviyeh, Iran. The apples with similar color and shape were collected from several trees in the same place. The samples were stored under cold conditions for five months. Five experiments were carried out; the first experiment was done immediately after harvesting and other tests were performed during storage time, i.e. 30, 60, 120, and 150 days after harvesting date. In each experiment, the samples were illuminated by two laser diodes at the wavelengths of 680 nm and 780 nm, separately. DSP images of each fruit were acquired using a CCD camera. Then, time history of the speckle pattern (THSP) was created for each sample. After taking images, reference measurements were carried out for each sample to determine its firmness. Quantification of DSP activity was done using the statistical features of inertia moment (IM) and the absolute value of differences (AVD) extracted from the THSP images. Moreover, features of the images were extracted based on texture and wavelet transform. Finally, artificial neural network (ANN) models were developed for prediction of apple firmness based on image's information obtained from the wavelengths of 680 nm and 780 nm, and the reference measurements. The 60, 15, and 25 percent of total samples were randomly used for calibration, cross-validation, and test validation sets, respectively. The correlation coefficient between measured and predicted values of the firmness and also the standard error of prediction (SEP) were calculated to compare the performance of the different ANN models.

Results and Discussion

After one month of the storage, apples lost about 15 percent of their initial firmness. The softening process continued and the firmness index dropped to 48.05 N (a total decrease of 42%). A significant difference was observed among the mean values of the firmness belong to the different storage times. In first and second months of the storage, a negative linear relationship was observed between DSP activity and the firmness. The lowest value of IM was observed for apples belonged to the harvesting date. DSP activity suddenly increased after 30 days of the storage. This ascending trend continued and reached to its maximum value on the 60th days of the storage. It was noted that DSP activity is significantly affected by the chlorophyll absorption during this period. Moreover, DSP activity at the wavelength of 680 nm was more than that at 780 nm. After two months of the storage, a significant decrease in DSP activity was observed for both wavelengths of 680 nm and 780 nm. The main reason for this phenomenon came back to changes in carbohydrates. During this ripening period, starch,

1- Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

2- Ph.D. Graduated Student, Mechanics of Biosystems Department, Urmia University, Urmia, Iran

3- Associate Professor, Mechanics of Biosystems Department, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

(* - Corresponding Author Email: b.jamshidi@areeo.ac.ir)

which plays a main role in backscattering phenomenon is converted into simpler carbohydrates and it causes an increase in soluble solid contents and a decrease in the number of scattering centers. After developing the ANN models, the correlation coefficient of the prediction (r_p) for different topologies was ranged from 0.74-0.81 and 0.81-0.83 for the wavelengths of 680 nm and 780 nm, respectively. Moreover, standard error of prediction (SEP) was between 8.4-9 N and 8.1-8.7 N for the wavelengths of 680 nm and 780 nm, respectively. The achieved results may be more attractive when they are compared with obtained results using multispectral/hyperspectral scattering imaging, as expensive and rather complicate techniques for non-destructive firmness assessment in apple fruits.

Conclusions

It was concluded that dynamic speckle patterns (DSP) or bio speckle imaging could be a simple, low-cost and appropriate technique for non-destructive prediction of firmness in intact apples during storage.

Keywords: Bio speckle imaging, Dynamic speckle patterns, Laser, Non-destructive, Wavelet