

پیش بینی سفتی میوه هلو با استفاده از سامانه تصویربرداری پس پراکنش نور لیزر

سینا احمدخانی^{۱*}، اصغر محمودی^۲، کاوه ملازاده^۳، حسین غفاری^۴

۱. کارشناس ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تبریز

۲. دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تبریز

۳. استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان

۴. مربی، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۲۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۲/۱)

چکیده

ارزیابی کیفیت محصولات کشاورزی از فعالیت‌های تأثیرگذار در عرصه تجارت، اقتصاد، و سلامت جوامع است. در همین راستا نیاز به روش‌های نوین در اندازه‌گیری کیفیت، روزه‌روز بیشتر می‌شود. از بین این روش‌ها، آزمون‌های غیرمخرب بیشتر مدنظر است. این مطالعه به امکان‌سنجی پیش‌بینی میزان سفتی میوه هلو به صورت غیرمخرب با روش تصویربرداری بر پایه نور لیزر که روشی نوین برای بررسی و پیش‌بینی برخی شاخص‌های کیفی محصولات کشاورزی است، می‌پردازد. بدین منظور، سامانه‌ای برای اخذ تصاویر پس پراکنش شامل یک دوربین تصویربرداری و یک دیود لیزری با طول موج ۶۵۰ نانومتر، پیاده‌سازی شد. پس از اخذ تصاویر نمونه‌ها، به منظور ارزیابی عملکرد این سامانه در پیش‌بینی میزان سفتی میوه هلو، از روش پردازش تصویر جهت استخراج اطلاعات لازم برای ساخت مدل‌های کالیبراسیون، استفاده شد. مدل‌های کالیبراسیون با روش‌های رگرسیون غیرخطی و شبکه‌های عصبی مصنوعی براساس تحلیل‌های مبتنی بر شدت و بافت ساخته شدند. با ارزیابی مدل‌ها، بهترین نتایج برای روش رگرسیون غیرخطی به دست آمدند. در پایان با ترکیب ویژگی‌های شدت و بافت و مدل‌سازی به روش رگرسیون غیرخطی ضریب همبستگی ۰/۸۹ برای پیش‌بینی سفتی میوه هلو به دست آمد.

کلیدواژگان: آزمون غیرمخرب، ارزیابی کیفی، پردازش تصویر، پس از برداشت.

مقدمه

روند روبه‌رشد جمعیت سبب افزایش روزافزون تقاضا برای محصولات کشاورزی شده است. امروزه برای مصرف‌کنندگان، کیفیت میوه‌ها و سبزیجات، همانند تولیدکنندگان اهمیت زیادی دارد. تعداد بسیار زیادی از مصرف‌کنندگان تمایل به پرداخت هزینه بیشتر در ازای کیفیت بالاتر محصول مورد نظر خود دارند. در رابطه با میوه‌ها، سفتی به‌عنوان پارامتر اساسی کیفیت در صنایع کشاورزی مطرح می‌شود. سفتی شاخصی مهم در تعیین بلوغ، کیفیت طبقه‌بندی، و زمان برداشت میوه‌ها است. هم‌چنین این پارامتر بر تصمیم خریداران برای میزان پرداخت هزینه محصولات کشاورزی تأثیر به‌سزایی دارد (Qing et al., 2007). طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک^۱ و تصویربرداری ابرطیفی^۲ برای پیش‌بینی خواص کیفی برخی محصولات کشاورزی از قبیل آلو

(Lu et al., 2006)، هلو (Abu-Khalaf & Bendsen, 2002)، سیب (Fan et al., 2009)، نارنگی (Liu et al., 2010)، و کیوی (Moghimi et al., 2010) در محدوده ۷۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر استفاده شده است (Romano et al., 2011). اگرچه در این روش‌ها همبستگی میان تغییرات ویژگی‌های بافت و خواص کیفی آن‌ها وجود دارد، اما تجهیزات استفاده‌شده در آن‌ها بسیار گران و اغلب غیرقابل دسترس هستند (Qing et al., 2007). در این میان، تصویربرداری پس پراکنش نور لیزر که به‌تازگی در کشاورزی کاربرد یافته است، با قابلیت دسترسی آسان و ارزانی تجهیزات، مورد توجه قرار گرفته است. این روش بر پایه جذب و پراکنش نور در برخورد با یک نمونه است. به‌هنگام برخورد نور، به‌عنوان بخشی از طیف الکترومغناطیس با ماده بیولوژیک، قسمتی از آن بازتابش، قسمتی عبور و مابقی در بافت نمونه جذب می‌شود. فقط ۴ تا ۵ درصد از نور از سطح بازتاب یا از درون بافت پس‌پراکنده می‌شود (Mollazade et al., 2012). میزان جذب نور به پارامترهای شیمیایی همچون رنگ‌دانه‌ها، قند، میزان آب، و مانند اینها وابسته است. از سوی دیگر پراکنش

* نویسنده مسئول: sina.ahmadkhani3@gmail.com

1. Near Infrared Spectroscopy
2. Hyper spectral imaging

سامانه تصویربرداری

سامانه طراحی و ساخته شده برای این پژوهش از یک دوربین تصویربرداری^۱ CCD (ساخت شرکت سونی، کشور ژاپن، مدل DSC-W100)، یک دیود لیزری با طول موج ۶۵۰ نانومتر (که براساس طول موج‌های ویژه گزارش شده توسط پژوهشگران انتخاب شد (Mollazade et al., 2012)). به‌عنوان منبع نوری، سیستمی برای کنترل توان نور خروجی لیزر و محافظه تصویربرداری تشکیل یافت. با توجه به اساس کار این پژوهش که بر پایه اطلاعات شدت تصاویر اخذ شده حاصل از پس‌پراکنش نور لیزر است، ثبات شدت لیزرها در تمامی مراحل آزمایشات اهمیت ویژه‌ای دارد. این ثبات از طرفی به جریان تغذیه دیود و از طرف دیگر به دمای کاری آن وابسته است. بنابراین فراهم آوردن این جریان یکنواخت و نیز تدابیری برای کاهش تأثیرات دما الزامی است. برای این منظور یک منبع تغذیه برای یکسوسازی و فراهم آوردن جریان مناسب و یکنواخت برای دیود، ساخته شد. برای کاهش حداکثر تأثیرات دما (که با گذشت زمان افزایش می‌یابد (Behjat, 2002))، یک خنک‌کننده روی دیود لیزر نصب شد. برای حصول اطمینان بیشتر، سیستمی مستقل ساخته شد و به‌منظور کنترل توان نور خروجی لیزر در مراحل گوناگون کاری استفاده شد. در مرحله بعد برای اطمینان از دقت طول موج ساطع شده توسط دیود لیزری، این دیود به وسیله یک طیف‌سنج مدل USB4000 ساخت شرکت Ocean Optics ایالات متحده آمریکا، تست شد (شکل ۱). سیستم طراحی شده شامل اجزای دیگری همچون پایه نگهدارنده دیود لیزری و نیز پایه برای قرارگیری نمونه، فیلترها، و محافظه تصویربرداری است. با توجه به اهمیت اخذ تصاویر تحت تابش نور تک‌فام لیزر و در نتیجه بهبود کیفیت تصاویر، از محافظه‌ای که می‌توانست شرایط کاملاً تاریکی را فراهم آورد، استفاده شد. پس از آماده‌سازی و هم‌چنین فراهم آوردن تمام اجزای سیستم تصویربرداری، شرایط برای شروع فرایند تصویربرداری از نمونه‌های اصلی در هر مرحله از برداشت مهیا شد. دیود لیزری تا حد امکان روی پایه اصلی بالا قرار گرفت تا زاویه بزرگتری از محیط تصویرگیری برای دوربین فراهم شود. سپس لیزر به وسیله بازوی نگهدارنده خود و نقاله موجود روی آن، به اندازه ۲۵ درجه از حالت تابش عمودی نسبت به زمین، به سمت نمونه تغییر جهت داده شد (شکل ۲). این مقدار از ۷ تا ۲۵ درجه پیشنهاد شده است (Mollazade et al., 2012). دوربین نیز دقیقاً در بالای نمونه‌ها تعبیه شد تا امکان تصویربرداری از نمونه‌ها تحت

نور پدیده‌ای فیزیکی و بیشتر وابسته به اندازه سلول‌ها و مشخصه‌های داخلی و خارجی ماتریس بافت نمونه است (Romano et al., 2011). Qing et al. (2007) از تصویربرداری پس‌پراکنش ساطع شده نور لیزر (در طول موج‌های ۶۸۰، ۷۸۰، ۸۸۰، ۹۴۰ و ۹۸۰ نانومتر) برای تحلیل مواد جامد حل‌شدنی و سفتی میوه سیب استفاده کردند. (Romano et al., 2011) از پردازش تصاویر به دست آمده از لیزر (در طول موج ۶۳۵ نانومتر) برای نظارت بر میزان رطوبت و مواد جامد حل‌شدنی میوه سیب طی فرایند خشک کردن استفاده کردند. (Mollazade et al., 2013) تصاویر سیب، آلو، گوجه‌فرنگی، و قارچ دکمه‌ای را که با سامانه تصویربرداری با نور لیزر در طول موج ۶۶۰ نانومتر اخذ کرده بودند، به‌منظور پیش‌بینی سفتی و مدول الاستیسیته آن‌ها بررسی کردند. (Udomkun et al., 2014) امکان استفاده از تحلیل پراکنش نور لیزر با استفاده از سه طول موج ۵۳۲، ۶۵۰، و ۷۸۰ نانومتر را در جهت پیش‌بینی میزان رطوبت، چروکیدگی، و رنگ میوه انبه طی فرایند خشک شدن، بررسی کردند.

با توجه به سرعت بالا در مقابل هزینه اندک، روش تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر تحولی نوین در عرصه ارزیابی کیفی محصولات کشاورزی است. بنابراین در این پژوهش روش فوق برای بررسی امکان پیش‌بینی پارامتر سفتی میوه هلو، مدنظر قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

نمونه‌های میوه

نمونه‌های هلو از رقم تک‌دانه و از مجموعه تحقیقاتی خلعت‌پوشان واقع در حومه شهر تبریز (با طول و عرض جغرافیایی به ترتیب ۴۶/۲۷ درجه شرقی و ۳۸/۰۳ درجه شمالی) تهیه شد. برداشت در پنج مرحله و به فواصل زمانی ۲ یا ۳ روزه صورت پذیرفت (روزهای نهم، یازدهم، سیزدهم، شانزدهم، و هجدهم شهریورماه ۱۳۹۳). در هر مرحله حدود ۲۰ تا ۳۰ عدد و در کل ۱۴۰ عدد هلو برداشت شد. برداشت با دست و با احتیاط لازم برای جلوگیری از هرگونه کوفتگی ناشی از فشار دست انجام گرفت، چراکه نداشتن دقت کافی در این مرحله می‌توانست داده‌های مربوط به آزمون سفتی را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. نمونه‌ها پس از برداشت به آزمایشگاه خواص بیوفیزیکی و مکانیکی محصولات کشاورزی گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه تبریز انتقال یافت. پیش از انجام هرگونه عملیات، نمونه‌ها به مدت ۱۵ ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس نگهداری می‌شدند.

1. Charge-Coupled Device

قطعه‌بندی به تصویر تک‌رنگ یا خاکستری تبدیل و با اجرای یک حلقه اقدام به حذف نواحی مورد نظر از تصویر می‌کرد. از این رو در این حلقه، دو آستانه برای انجام عملیات در نظر گرفته شد. ابتدا برای حذف پس‌زمینه، آستانه پایین استفاده شد که در نتیجه از دو روش آستانه‌گذاری عمومی و اتسو^۲ استفاده شد (Qing *et al.*, 2007). آستانه بالا نیز برای حذف ناحیه اشباع، به صورت مستقیم از روی هیستوگرام تصاویر تشخیص و مقدار ۲۵۰ معین شد (Qing *et al.*, 2007). روش‌های گوناگونی برای استخراج ویژگی از تصاویر پس‌پراکنش می‌تواند استفاده شود. این روش‌ها به دو دسته عمده تحلیل شدت و بافت تقسیم می‌شوند (Mollazade *et al.*, 2012). در پژوهش حاضر هر دوی این روش‌ها براساس پارامترهای آماری مخصوص به خود به کار گرفته شده است. روش اول بر پایه شدت پیکسل‌های تصویر است. برای این منظور پس از قطعه‌بندی تصاویر، ویژگی‌های آماری آن‌ها مطابق جدول ۱ استخراج شدند. در روش مبتنی بر بافت که براساس احتمال رخداد هر یک از سطوح شدت است، از هیستوگرام نرمال شده برای استخراج پارامترهای آماری استفاده می‌شود. برای این منظور، پس از قطعه‌بندی تصاویر، فراوانی رخداد هر یک از سطوح شدت با رابطه ۱ نرمال شده است.

$$P(z_i) = \frac{h(z_i)}{n} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن: $h(z_i)$ تابع هیستوگرام، n تعداد کل پیکسل‌های تصویر و $P(z_i)$ احتمال رخداد سطوح شدت است. حال با استفاده از مقادیر نرمال شده، پارامترهای مربوط (جدول ۱) برای این روش، استخراج شدند (Mollazade *et al.*, 2013).

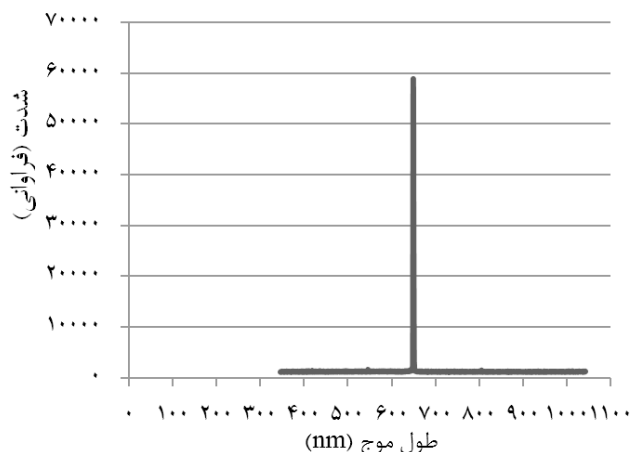
داده‌های مرجع

پس از اخذ تصاویر پس‌پراکنش از نمونه‌ها، سفتی آن‌ها، بلافاصله با روش مگنس-تیلر، با دستگاه Instron1140 با نرخ بارگذاری ۵۰ mm/min و به‌کارگیری پروب ۷/۹ میلی‌متری برای نفوذ به بافت نمونه‌ها به دست آمدند. قبل از شروع این آزمایش، ابتدا پوست میوه در محل مورد نظر به ضخامت ۲ میلی‌متر گرفته شد. در نهایت حداکثر نیرو در عمق نفوذ ۸ میلی‌متری به‌عنوان سفتی نمونه در آن نقطه ثبت شد. با تکرار آزمایش در سه نقطه، میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده به‌عنوان سفتی کلی میوه‌ها در نظر گرفته شد (Dobrzanski *et al.*, 2006).

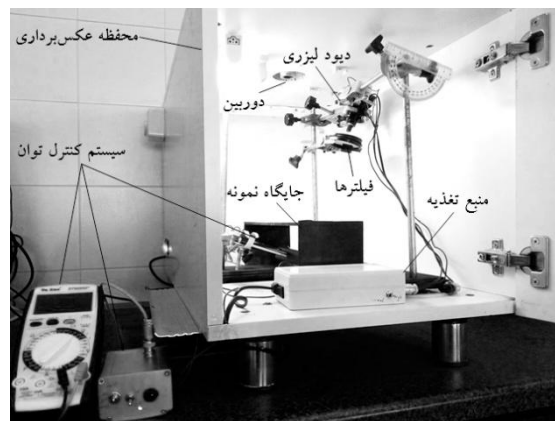
مدل‌های کالیبراسیون

استفاده از مدل‌های کالیبراسیون برای ارائه روابط و نیز تأثیرات

تابش نور لیزر ایجاد شود. شایان ذکر است که تمامی تنظیمات سیستم از آغاز تا پایان آزمایش‌ها ثابت و تنها فاکتور متغیر، نمونه بود. توان لیزرها نیز با توالی ۵ تصویربرداری، توسط دستگاه کنترل توان نور خروجی لیزر، کنترل شد.



شکل ۱. نمودار طیف الکترومغناطیس دیود با طول موج ۶۵۰ نانومتر



شکل ۲. سامانه تصویربرداری

پردازش تصویر

تصاویر پس‌پراکنش حاصل از برخورد نور لیزر با نمونه به صورت رنگی با دوربین CCD اخذ شد. سپس این تصاویر به یک رایانه به‌منظور انجام پردازش تصاویر انتقال یافت. قطعه‌بندی^۱ تصاویر پس‌پراکنش از مهم‌ترین فرایندهای پردازش است (Mollazade *et al.*, 2012). اهمیت قطعه‌بندی برای این تصاویر، به‌علت وجود ناحیه اشباع (ناحیه‌ای از تصویر که فوتون‌ها به صورت مستقیم به لنز دوربین می‌رسند) و نیز پس‌زمینه آن، دو چندان است. بنابراین قطعه‌بندی تصاویر پس‌پراکنش خود شامل دو بخش خواهد بود. برای این منظور، دستوری برای حذف ناحیه اشباع و نیز پس‌زمینه تصویر در نرم‌افزار MATLAB2011a نوشته شد. این دستور ابتدا تصویر را فراخوانی و سپس برای انجام مراحل

جدول ۱. ویژگی‌های آماری مربوط به تحلیل‌های شدت و بافت

تحلیل	ویژگی آماری	توضیح
	مجموع شدت‌ها	مجموع شدت‌های غیر صفر
	حداکثر شدت	بیشترین مقدار شدت غیر صفر
	حداقل شدت	میانگین شدت‌های غیر صفر
مبتنی بر شدت	میانگین هندسی	میزان تمایل به میانگین حسابی
	میانگین هارمونیک	میزان تمایل به میانگین حسابی
	انحراف معیار	فاصله شدت‌ها از میانگین
	واریانس	نحوه پراکندگی شدت‌ها حول میانگین
	میانگین حسابی	میانگین شدت بافت
	انحراف معیار	فاصله شدت‌های بافت از میانگین
مبتنی بر بافت	همواری	این مقدار برای ناحیه‌های با سطوح شدت ثابت صفر است.
	چولگی	میزان تقارن یک هیستوگرام
	کشیدگی	میزان قله‌ای بودن هیستوگرام تصویر
	ضریب تغییرات	نسبت انحراف معیار به میانگین

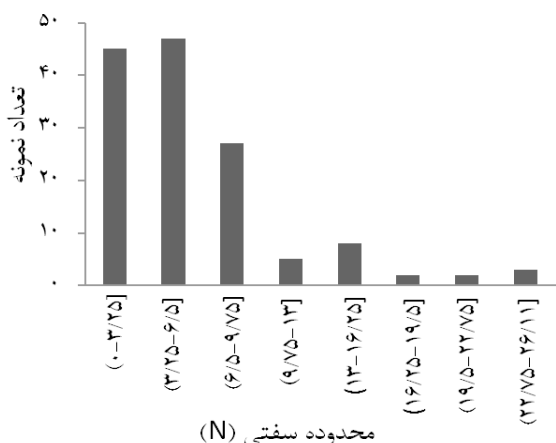
نتایج و بحث

نتایج آزمون مخرب

نتایج حاصل از این آزمون برای ۱۴۰ نمونه استفاده شده در پژوهش حاضر در جدول ۲ آمده است. این نتایج محدوده وسیعی (۰/۹۷ تا ۲۶/۱۱ نیوتن) از تغییرات را برای این پارامتر نشان می‌دهند. انحراف معیار بالای این مقادیر نیز حاکی از پراکندگی زیاد داده‌های به دست آمده طی مراحل گوناگون برداشت است. نمودار شکل ۳ به خوبی این توزیع غیریکنواخت را نشان می‌دهد.

جدول ۲. ویژگی‌های آماری پارامتر سفتی نمونه‌ها

پارامتر کیفی	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
سفتی (N)	۰/۹۷	۲۶/۱۱	۷/۴۸	۵/۸۰



شکل ۳. نمودار توزیع سفتی نمونه‌ها

متقابل پارامترهای اندازه‌گیری شده، اجتناب‌ناپذیر است. برای این منظور روش‌های گوناگونی ابداع شده‌اند و بسته به نوع داده‌ها و اهداف مورد نظر می‌توانند نتایج متفاوتی را به دست آورند (Aalami et al., 2013). روش رگرسیون غیرخطی و شبکه عصبی مصنوعی از این روش‌ها هستند که به طور گسترده مورد استفاده پژوهشگران قرار می‌گیرند. برای ارائه شبکه‌های عصبی مصنوعی از نرم‌افزار MATLAB2011a و برای ساخت مدل رگرسیون از نرم‌افزار SPSS16 استفاده شد. نوع شبکه براساس هدف مورد نظر که در این پژوهش پیش‌گویی یک پارامتر (عدد) در هر مرحله است، از نوع پرسپترون چندلایه (MLP) انتخاب شد. سپس دو لایه (یک لایه پنهان و یک لایه خروجی) و توابع مربوط به هر لایه تعیین شد. برای این منظور تابع انتقال برای لایه پنهان tansig و برای لایه خروجی purelin انتخاب شد. سرانجام شبکه مطابق با تنظیمات مذکور ایجاد شد. پس از استخراج اطلاعات مربوط به تحلیل‌های مبتنی بر شدت و بافت از تمامی تصاویر، تعداد ۱۱۰ نمونه (حدود ۸۰ درصد) به طور تصادفی برای ساخت مدل‌ها و مابقی به منظور ارزیابی نهایی آن‌ها جدا شد (از ۱۱۰ داده مذکور، میزان ۲۰ درصد نیز برای اعتبارسنجی مدل در روش شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده شد). پیش از انتخاب پارامترهای مناسب به عنوان ورودی مدل‌ها در هر مرحله، نمودار پراکندگی آن‌ها در نرم‌افزار Excel2010 ترسیم شد و از انتخاب پارامترهای با تغییرات مشابه جلوگیری به عمل آمد. این کار علاوه بر کاهش زمان ایجاد مدل‌ها، مشکلات ناشی از هم‌پوشانی داده‌ها را نیز برطرف می‌کند.

ارزیابی مدل‌ها

به منظور مقایسه و ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌های گوناگون، از دو پارامتر ضریب همبستگی (R) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) مطابق رابطه‌های ۲ و ۳ استفاده شد (Mollazade et al., 2013).

(رابطه ۲)

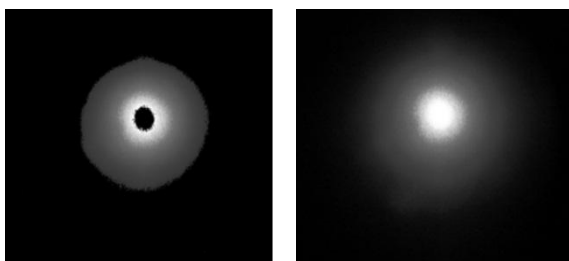
$$R = \frac{n \sum P.A - (\sum P)(\sum A)}{\sqrt{n(\sum P^2) - (\sum P)^2} \sqrt{n(\sum A^2) - (\sum A)^2}}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (P - A)^2}$$

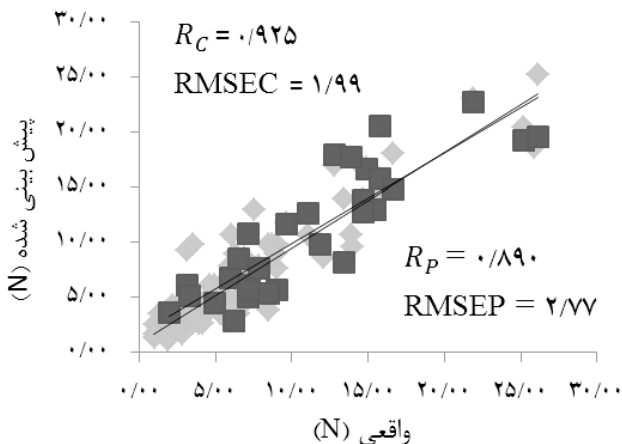
(رابطه ۳)

که در آن‌ها: P مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها، A مقادیر اندازه‌گیری شده توسط آزمون مخرب، و n تعداد نمونه‌هاست.

اساس، در مرحله بعد مدلی با روش رگرسیون غیرخطی و ترکیب ورودی‌های مبتنی بر تحلیل‌های شدت و بافت ساخته شد. نتایج حاصل از این مدل ترکیبی، حاکی از افزایش ضریب همبستگی (۰/۹۲۵) و کاهش RMSE (۱/۹۹) است. شکل ۶، نمودار مربوط به مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل ترکیبی برای داده‌های کالیبراسیون و آزمون را نشان می‌دهد. این مقادیر در مقایسه با نتایج حاصل از پژوهش Lu & Peng (2006) برای پیش‌بینی سفتی دو رقم از میوه هلو با استفاده از تصویربرداری ابرطیفی، برتری محسوسی را نشان می‌دهد. بر این اساس ضرایب همبستگی برای پیش‌بینی داده‌های آزمون در مطالعه آن‌ها مقادیر ۰/۷۴ و ۰/۸۷ گزارش شده است. در حالی که این ضریب در پژوهش حاضر مقدار ۰/۸۹ به دست آمد.



شکل ۵. نمونه‌ای از تصاویر پس پراکنش نور لیزر قبل از قطعه‌بندی (سمت راست) و بعد از آن (سمت چپ)



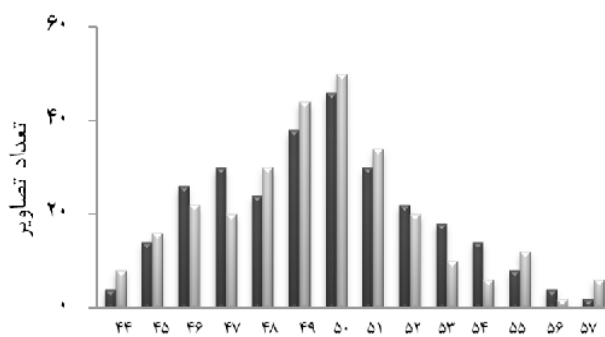
شکل ۶. نمودار پراکندگی داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل ترکیبی در برابر مقادیر واقعی به همراه R و RMSE برای مرحله کالیبراسیون و ارزیابی مدل

جدول ۳. نتایج حاصل از مدل‌های کالیبراسیون

مدل کالیبراسیون	تحلیل مبتنی بر شدت		تحلیل مبتنی بر بافت	
	RMSE	R	RMSE	R
NLR	۳/۱۶۰	۰/۹۱۷	۲/۱۲۴	۰/۹۱۵
ANN	۳/۹۷۰	۰/۷۹۵	۴/۱۰۰	۰/۷۸۳

نتایج پردازش تصویر

به منظور قطعه‌بندی تصاویر پس پراکنش، مقدار آستانه بالا برابر ۲۵۰ و آستانه پایین براساس روش‌های آستانه‌گذاری عمومی و اتسو محاسبه شد (Qing et al., 2007). در نتیجه مقادیر پایین آستانه برای تمامی نمونه‌ها محاسبه شد. همان‌طور که از نمودار شکل ۴ مشخص است، مقادیر آستانه برای تصاویر مربوط به لیزر ۶۵۰ نانومتری محدوده‌های ۴۴ الی ۵۷ است. بنابراین آستانه پایین، مقادیر دارای بیشترین فراوانی انتخاب شد. بدین ترتیب، آستانه ۵۰ برای لیزر ۶۵۰ نانومتر به دست آمد. در شکل ۵ نمونه‌ای از تصاویر قبل و بعد از عملیات قطعه‌بندی برای یک محصول ملاحظه می‌شود.



شکل ۴. مقادیر آستانه برای لیزر ۶۵۰ نانومتر، ستون‌های سمت راست مقادیر حاصل از روش اتسو و ستون‌های سمت چپ مقادیر حاصل از روش آستانه‌گذاری عمومی است

مدل‌های کالیبراسیون

پارامترهای آماری تصاویر قطعه‌بندی شده به منظور حذف پارامترهای با تغییرات مشابه ارزیابی شدند. بر این اساس ویژگی‌های مجموع شدت‌ها، حداقل شدت‌ها، انحراف معیار، و میانگین هارمونیک برای روش مبتنی بر شدت و میانگین حسابی، همواری، چولگی، و ضریب تغییرات برای روش مبتنی بر بافت انتخاب شدند. پس از انتخاب این ویژگی‌ها، از آن‌ها به عنوان ورودی مدل‌ها در هر یک از روش‌های تحلیلی شدت و بافت استفاده شد. ضرایب همبستگی و ریشه میانگین مربعات خطا حاصل از تحلیل‌های مبتنی بر شدت و بافت شامل نتایج یک مدل رگرسیونی غیرخطی (NLR) و یک مدل براساس شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، در جدول ۳ ارائه شده است (لازم به ذکر است که در زمینه شبکه‌های عصبی مصنوعی از ضریب همبستگی مربوط به داده‌های اعتبارسنجی استفاده شد). با مقایسه مقادیر به دست آمده، روش رگرسیون غیرخطی با ضرایب همبستگی بیشتر (۰/۹۱۷ و ۰/۹۱۵) در برابر RMSE کمتر (۳/۱۶۰ و ۲/۱۲۴)، به عنوان مدل برتر انتخاب شد. بر این

نتیجه‌گیری

استفاده از سامانه تصویربرداری پس‌پراکنش نور لیزر طراحی و ساخته‌شده در این پژوهش برای پیش‌بینی پارامتر سفتی، رضایت‌بخش بود. از دلایل اصلی این امر می‌توان به انتخاب صحیح طول موج دیود لیزری، ثبات شدت نور ساطع‌شده توسط آن در تمامی مراحل کاری و نیز به‌کارگیری دوربین تصویربرداری مناسب، برای ثبت تغییرات پس‌پراکنش دانست. تغییرات شایان توجه در ساختار سلولی (فیزیکی) بافت، افزایش

میزان کاروتنوئیدها (Romano *et al.*, 2011) (کاهش میزان کلروفیل) طی مراحل رسیدگی، و تخلخل پایین نمونه، از دیگر دلایل به‌دست‌آمدن این نتایج است. تحلیل‌های مبتنی بر شدت و بافت، از آنجا که در این پژوهش هر دو بر پایه ویژگی‌های آماری صورت گرفت، برتری محسوسی در برابر هم نداشتند. به‌کارگیری طول موج‌های مؤثر بیشتر و همچنین بررسی سایر روش‌های تحلیلی پیشنهاد می‌شود.

REFERENCES

- Aalami, M. T., Sadeghfam, S., Fazelifard, M. H. Naghipour, L. (2013) *Data Series Modeling*. (1th ed.). Tabriz University Publications. (In Farsi).
- Abu-Khalaf, N. Bennedsen, B. S. (2002). Plum-Tasting Using Near Infra-Red (Nir) Technology. *International Agrophysics*, 16, 83-89.
- Behjat, A. (2002) *Laser, Principles and Applications*. (1th ed.). Yazd University Publications. (In Farsi).
- Dobrzanski, B. Rabcewicz, J. Rybczynski, R. (2006) *Handling of Apple: Transport Techniques and Efficiency Vibration. Damage and Bruising Texture. Firmness and Quality*. Institute of Agrophysics of Polish Academy of Sciences.
- Fan, G. Zha, J. Du, R. Gao, L. (2009). Determination of Soluble Solids and Firmness of Apples by Vis/Nir Transmittance. *Journal of Food Engineering*, 93, 416-420.
- Liu, Y. Sun, X. Zhang, H. Aiguo, O. (2010). Nondestructive Measurement of Internal Quality of Nanfeng Mandarin Fruit by Charge Coupled Device Near Infrared Spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture*, 71, 10-14.
- Lu, R. Peng, Y. (2006). Hyperspectral Scattering for Assessing Peach Fruit Firmness. *Biosystems Engineering*, 93(2), 161-171.
- Moghimi, A. Aghkhani, M. H. Sazgarnia, A. Sarmad, M. (2010). Vis/Nir Spectroscopy and Chemometrics for the Prediction of Soluble Solids Content and Acidity (Ph) of Kiwifruit. *Biosystems Engineering*, 106, 295-302.
- Mollazade, K. Omid, M. Akhlaghian, T. F. Mohtasebi, S. S. (2012). Principles and Applications of Light Backscattering Imaging in Quality Evaluation of Agro-Food and Products: A Review. *Food Bioprocess Technology*, 5, 1465-1485.
- Mollazade, K. Omid, M. Akhlaghian, T. F. Rezaei, K. Y. Mohtasebi, S. S. Zude, M. (2013). Analysis of Texture-Based Features for Predicting Mechanical Properties of Horticultural Products by Laser Light Backscattering Imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 98, 34-45.
- Qing, Z. Ji, B. Zude, M. (2007). Predicting Soluble Solid Content and Firmness in Apple Fruit by Means of Laser Light Backscattering Image Analysis. *Journal of Food Engineering*, 82, 58-67.
- Romano, G. Nagle, M. Argyropoulos, D. Muller, J. (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.
- Udomkun, P. Nagle, M. Mahayothee, B. Muller, J. (2014). Laser-Based Imaging System for Non-Invasive Monitoring of Quality Changes of Papaya During Drying. *Food Control*, 42, 225-233.