

## بررسی قابلیت روش تصویربرداری پیسه ای پویا برای ارزیابی غیرمخرب ویژگی های

### مکانیکی سیب (گلدن دلشیز)

امید امیدی ارجنکی<sup>۱\*</sup>، داود قنبریان<sup>۲</sup>، کاوه ملازاده<sup>۳</sup>، مجتبی نادری<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد

۲- عضو هیئت علمی گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد

۳- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان

\* ایمیل نویسنده مسئول: [omidmac@gmail.com](mailto:omidmac@gmail.com)

#### چکیده

در این پژوهش امکان استفاده از تصویربرداری پیسه ای پویا در طول موج ۷۸۰ نانومتر برای تعیین غیر مخرب و سریع برخی خواص مکانیکی در سیب رقم گلدن دلشیز بررسی شده است. تصاویر از سیب های درختی کامل تهیه شدند و روابط کمی به صورت مدل‌هایی مابین داده های طیفی و برخی ویژگی های مکانیکی (مانند مدول الاستیسیته، کرنش و تنش شکست و ...) اندازه گیری شده توسط دستگاه آزمون سنتام، توسط ANFIS بدست آمدند. در این روند از روش های تحلیل مولفه های اصلی (PCA) و اعتبارسنجی متقابل (CV) به منظور انتخاب مؤثرترین و مهمترین ویژگی ها و برای بهبود بازدهی مدل ها در تخمین ویژگی ها استفاده شد. مدل ها بر مبنای تغییر پارامتر های انتخاب شده ANFIS توسعه داده شدند و بازدهی و کارایی آنها برای یافتن بهترین مدل برای پیش بینی ویژگی های مکانیکی مورد انتظار در سیب با هم مقایسه شدند. طبق نتایج حاصل، مدل پیش بینی مقدار کرنش شکست سیب با ضریب تعیین ۰/۹۲۰ و با خطای میانگین ۰/۰۱۰ به عنوان بهترین مدل این پژوهش بدست آمد. نتایج کلی پژوهش نشان داد که تصویربرداری پیسه ای پویا توانایی خوبی برای پیش بینی و تعیین ویژگی های مکانیکی سیب در حالت غیر مخرب و سریع دارد.

**واژه‌های کلیدی:** پیسه زیستی، تصویربرداری لیزری، سیب.

#### مقدمه

کیفیت بافت میوه های تازه وابسته به وارسته، میزان رسیدگی، ارتفاع مکان رشد و شرایط پس از برداشت دارد و به طور گسترده توسط خواص و ویژگی های مکانیکی و ساختاری بافت میوه سنجش و تعیین میشود. در زمان رسیدن میوه و محصولات کشاورزی، بافت گوشتی یک سیب، نرم شده و ویژگی های درون سلولی آن آفت میکند؛ بافت نشاسته ای آن تخریب و تجزیه و دیواره سلول های آن نیز تخریب میشود. تغییر بافت حین رسیدن اغلب میوه ها غالباً نتیجه آفت دیواره سلولی است و همچنین



تغییرات ریز ساختاری سلول ها بر روی تغییرات درشت نمود بافت مؤثر است (Cho *et al.*, 1997; Cho, 1999). سیب رقم گلدن دلشیز دارای مقدار زیادی منفذ روی لایه مومی خویش است که توسط چشم غیر مسلح دیده نمی‌شوند. پس از برداشت سیب، به دلیل اینکه از این منافذ مقدار متغیر زیادی آب از دست می‌رود، در این شرایط فشار تورژانس کاهش یافته و میوه تازگی و آبداری اش را از دست می‌دهد (Rahimi, 2003). در همین راستا رابطه بین کیفیت میوه و تغییرات فیزیولوژی به صورت گسترده مورد تحقیق و پژوهش قرار گرفته است (Haiyan *et al.*, 2013; Varela *et al.*, 2007; Somers, 1965; Alamar *et al.*, 2008; Varela *et al.*, 2007). بافت میوه و خواص مکانیکی را به طور مرسوم میتوان با استفاده از روش‌هایی مبتنی بر اصول نیرو - تغییر شکل، ضربه و ارتعاش مرتبط کرد (Tscheuschner and Du, 1988; Mendoza *et al.*, 2012; Masoudi *et al.*, 2007; Holt and Schoorl, 1984). هرچند، این روش‌ها مخرب و زمانبر هستند و از میوه‌ای تا میوه مشابه دیگر و برای نقاط مختلفی از یک میوه برای خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده میتواند متفاوت باشد. برای رفع این مشکلات و معایب، تحقیقات پرهزینه و بسیاری بر پایه علوم و روش‌های مختلف انجام شده است. از روش‌های مورد توجه این پژوهش استفاده از روش پردازش تصاویر حاصل از روش نوری خاص مبتنی بر لیزر است. روش‌های ماشین‌بینایی مبتنی بر لیزر اعم از روش تصویر برداری پس پراکنش و روش پیسه‌زیستی در سال‌های اخیر مورد توجه محققین صنایع غذایی و کشاورزی قرار گرفته‌اند.

روش پیسه‌زیستی<sup>1</sup> یک روش غیر مخرب برای بررسی خواص حیاتی مواد زیستی است. این روش بر مبنای رخداد پدیده نوری حین نوردهی نمونه توسط یک نور همدوس است. پرتوهای طیفی با یک دیگر تداخل کرده و در آشکار ساز به صورت تصویر، در شکل تصادفی و با الگوی دانه‌ای شامل نقاط تاریک و روشن (پیسه) در می‌آیند. اگر نمونه نوردهی شده هیچ فعالیت بیولوژیکی از خود نداشته باشد، تصاویر ثابت هستند. در حالت به کار بردن نمونه‌های بیولوژیکی، توزیع شدت در تصاویر نهایی تشدید و یا نوسان می‌یابد (Adamiak *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 1995; Zhao *et al.*, 1997).

اولین گزارش استفاده از روش تصویربرداری پیسه‌زیستی و اندازه‌گیری فعالیت پیسه‌زیستی نشان دهنده وجود فرآیند‌های مختلف در درون یک سلول بود (Zdunek *et al.*, 2014). در پژوهشی دیگر از روش بررسی تغییرات زمانی پیسه‌ها برای تعیین وجود قارچ در دانه‌های لوبیا استفاده شد (Braga *et al.*, 2005). همچنین با برآورد فعالیت پیسه‌زیستی سفتی سیب در چهار مرحله پیش از برداشت تخمین زده شد (Szymanska-Chargot *et al.*, 2012). در این پژوهش تصاویر پیسه‌زیستی در طول موج ۶۳۵ نانومتر حاصل شد و رابطه بین تصاویر متوالی نیز بدست آمد. نتایج نشان دهنده یک رابطه خطی منفی ( $R=-0.89$ ) مابین سفتی و فعالیت پیسه‌زیستی بود. همچنین تأیید شد که این روش پتانسیل خوبی برای استفاده در تخمین غیر مخرب سفتی در دوره پیش از برداشت دارد. در مطالعه دیگری، از این روش برای تعیین تغییرات سفتی سیب در طول انبارمانی استفاده (Zdunek and Cybulska, 2011) و مشاهده شد که فعالیت پیسه‌زیستی زمانیکه سیب سفتی خود را از دست می‌دهد کاهش می‌یابد. به

<sup>1</sup> Bio-speckle

نظر میرسد این قابلیت مناسب در کاربرد روش به سبب این رویه باشد که نور لیزر در شرایطی میتواند به اندازه ۷ تا ۱۰ میلی متر وارد بافت سیب شود (Xu *et al.*, 1995) و بدین سبب میتوان اطلاعاتی درباره بافت، حالت و شرایط سلول های بافتی زیر پوست بدست آورد. این به معنای آنست که، یک امکان مناسب برای کشف و مشاهده تغییرات درونی سلول ها وجود دارد و بدین ترتیب سعی پژوهشگران بر ساخت یک مدل برای پیش بینی خواص مکانیکی بوده است.

مدتهاست که سفتی تنها خاصیت مکانیکی است که توسط روش پیسه زیستی مورد ارزیابی قرار میگیرد. دوپرات و همکاران در سال ۱۹۹۵ از یک مازول دیودی لیزر در طول موج ۶۷۰ نانومتر به عنوان منبع نور برای تخمین میزان رسیدگی سیب استفاده کردند. آنها از ویژگی مقدار قطر نقطه نور لیزر در تصاویر به عنوان شاخص سفتی سیب استفاده کردند و یافتند که با افزایش میزان رسیدگی سیب قطر نیز افزایش می یابد. بسیاری از محققان نیز از این روش برای ارزیابی کیفیت سیب استفاده کردند (Lu, 2004; Peng and Lu, 2006; Tu *et al.*, 2006; Noh and Lu, 2007; Romano *et al.*, 2011; Baranyai and Zude, 2009).

بر طبق مشاهده ها، گزارش پیش بینی دیگر خواص مکانیکی، علاوه بر میزان سفتی در سیب و یا هر محصول و میوه ای با استفاده از روش تصویربرداری پیسه زیستی مشاهده نشد. بنابراین، هدف کلی این مطالعه توسعه یک مدل مبتنی بر تصویر برداری پیسه زیستی برای پیش بینی برخی خواص مکانیکی سیب است.

## مواد و روش ها

### آماده سازی نمونه ها

تعداد ۱۰۰ نمونه سیب سالم و تازه از واریته گلدن دلشیز، از باغی تجاری در استان چهارمحال و بختیاری و با دقت کافی به منظور داشتن شرایط یکسان از لحاظ شکل، اندازه، رنگ، و کیفیت رسیدگی مطلوب برداشت شدند. همه سیب های انتخاب شده عاری از هرگونه آسیب و لکه بودند و میانگین قطر آنها در حدود ۷۳ تا ۷۸ میلی متر بود. تمامی سیب ها پس از برداشت به آزمایشگاه خواص فیزیکی و مکانیکی گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم در دانشگاه شهرکرد منتقل و آماده تصویر برداری شدند.

در مرحله تصویربرداری پیسه زیستی برای هر نمونه سیب انجام و سپس آزمون فشار تک محوری روی نمونه های استخراج شده از سیب ها انجام گرفت. ویژگی های استخراج شده از آزمون های مکانیکی عبارتند از: مدول الاستیسیته مماسی در واحد مگاپاسکال برای تراکم های ۲/۵، ۰/۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد و مدول الاستیسیته سکانتی.

## تهیه، بررسی و تحلیل تصاویر پیسه زیستی

سامانه تصویربرداری پیسه زیستی شامل یک آشکار ساز، منبع نوری و یک اتاقک تصویر مستقر شده همراه با دستگاه

آزمون مکانیکی است (شکل ۱).



شکل ۱ - آشکار ساز، لیزر و دستگاه آزمون مکانیکی

آشکار ساز، یک دوربین صنعتی CCD (DH-IPC-HF8301E، چین) مجهز شده به یک لنز دهانه متغیر (۲.۸ تا ۱۲ میلی متری، ۱.۳ CCTV اینچ) و نصب شده به صورت عمود بر استوای سیب با فاصله ۲۰ میلی متری در اتاقک تصویر مستقر شد. دوربین نزدیک به یک دیود لیزری کم توان (۵ میلی وات) با طول موج ۷۸۰ (Arefi *et al.*, 2016) نانومتر قرار داشت. طبق نتایج آزمون و خطاهای انجام شده در مرحله پیش آزمون، زاویه بین دوربین و لیزر در حدود ۳۲ درجه و فاصله بین لیزر و نمونه در حدود ۲۵۰ میلی متر تنظیم شد. برای بسط قطر نور و پرتو لیزر، دیود لیزر مجهز به یک لنز شد تا مقدار قطر ۳ میلی متری برای قطر آن تنظیم گردد. به منظور جلوگیری از بازتابش های محیطی و نورهای مزاحم، عملیات تصویربرداری در یک اتاقک تاریک و بسته انجام شد. برای تصویربرداری، هر سیب به صورت کامل روبروی دوربین و لیزر قرار گرفت و نقطه ای از استوای میوه توسط پرتو لیزر مورد نوردهی قرار گرفت. تصاویر پیسه توسط دوربین با سرعت ۳۰ فریم در ثانیه (fps) در مدت زمان بیش از ۱۶ ثانیه برای حصول ۵۰۰ فریم ضبط شد. برای نمونه فعالیت پیسه زیستی طبق یک فایل ویدئویی با قالب AVI در رایانه ذخیره گردید. در ادامه عملیات پردازش تصاویر نیز در نرم افزار MATLAB R2015b و جعبه ابزار پردازش تصویر آن صورت گرفت.



## حصول تصاویر THSP

راه معمول و مرسوم برای پردازش تصاویر پیسه زیستی، روش الگوی تاریخچه زمانی پیسه زیستی<sup>1</sup> است. این الگو با ستون یا ردیف میانی هر فریم از ویدئوی تهیه شده ساخته میشود. این ستون‌ها یا ردیف‌ها در کنار هم تشکیل تصویر THSP را میدهند. محور افقی یا عمودی تصویر نهایی (بسته به انتخاب ستون یا ردیف) نشان دهنده تغییرات شدت پیسه‌ها در طول زمان است. به طور مثال از این تغییرات میتوان به یک کشیدگی افقی در فعالیت کم و یا یک الگوی معمولی و عادی در فعالیت زیاد به عنوان اطلاعات ابتدایی ای که میتوان با نگاه به تصویر THSP بدست آورد اشاره کرد (Arizaga et al., 1999). در این پژوهش، اندازه تصویر THSP در ابعاد 400 در 500 پیکسل بدست آمد. شاخص‌هایی که برای بررسی و تحلیل تصاویر پیسه زیستی مورد استفاده قرار گرفتند در دو بخش ویژگی‌های آماری و بافتی تقسیم شدند. سه ویژگی آماری (به عنوان ویژگی‌های THSP) تابع خودهمبستگی<sup>2</sup>، ممان اینرسی یا IM<sup>3</sup> و مقدار مطلق اختلاف یا (AVD<sup>4</sup>)، و چهار ویژگی بافتی (ماتریس هم‌وقوعی سطح خاکستری یا GLCM، ماتریس طول گام سطح خاکستری یا GLRLM، الگوی دودویی محلی یا LBP و تبدیل موجک) در نظر گرفته شدند.

## استخراج ویژگی‌های آماری

تابع ریاضی خودهمبستگی، همبستگی تقاطعی یک متغیر را با خودش در دو نقطه زمانی محاسبه میکند. در فعالیت زیاد، به دلیل کاهش همبستگی بین فریم‌ها مقدار تابع خودهمبستگی نیز افت میکند. ممان اینرسی (IM) نیز از ماتریس هم‌وقوعی حاصل شده از تصویر THSP محاسبه میشود. ماتریس هم‌وقوعی شامل مقادیر صفر و غیر صفر حول قطر اصلی است. در فعالیت زیاد تعداد مقادیر غیر صفر افزایش می‌یابد. ممان اینرسی در واقع بیان مقدار توزیع مقادیر غیر صفر است. در تخمین یک پدیده با یک فعالیت معمولی و میانه، ویژگی ممان اینرسی احتمالاً به اندازه کافی مفید نباشد. بنابراین یک ویژگی تغییر یافته منتج از ممان اینرسی به نام پارامتر مقدار مطلق اختلاف نیز ارائه شد (Braga et al., 2005). در فعالیت کم پیسه زیستی، تابع خودهمبستگی به آرامی افت کرده و مقادیر ممان اینرسی و مقدار مطلق اختلاف نیز کاهش می‌یابند.

## ویژگی‌های بافتی

ماتریس هم‌وقوعی ماتریسی است که هر درایه آن تعداد دفعاتی را مشخص میکند که جفت پیکسل‌های با دو شدت مختلف در موقعیتی از تصویر قرار دارند که موقعیت مکانی دو پیکسل نسبت به هم در همان تصویر مشخص میکند. در واقع این ماتریس بیانگر تعداد پیکسل‌های سطح خاکستری با دو شدت مختلف به صورت جفتی در فاصله نسبی معین و تحت زاویه معین

<sup>1</sup> Time-History Speckle Pattern (THSP)

<sup>2</sup> Autocorrelation function

<sup>3</sup> Inertia moment

<sup>4</sup> Absolute value of differences

بین آنها می باشد (Mollazade *et al.*, 2013). در این پژوهش فاصله بین پیکسل ها برابر با یک و زاویه در راستای صفر درجه در نظر گرفته شد. پس از استخراج ماتریس هم وقوعی با استفاده از مجموع درایه های هر ماتریس آن را نرمال کرده و در نهایت ۲۲ ویژگی که بیانگر اطلاعاتی در مورد بافت تصویر است از ماتریس هم وقوعی نرمال شده استخراج گردید.

ماتریس طول گام سطح خاکستری به صورت یک خط از پیکسل ها در یک جهت معین با مقادیر شدت سطح خاکستری یکسان تعریف میگردد. تعداد پیکسل های موجود در هر گام سطح خاکستری، مشخص کننده طول گام سطح خاکستری و تعداد وقوع طول گام های یکسان بیانگر مقدار طول گام است. هر ماتریس یک آرایه دو بعدی است که هر درایه آن تعداد کل وقوع گام  $z$  در سطح خاکستری  $i$  و  $i$  و  $z$  معرف شماره سطر و ستون درایه در ماتریس GLRLM هستند) را در راستای معین مشخص مینماید (Mollazade *et al.*, 2013). ماتریس های طول گام برای تصاویر استخراج گردید و در نهایت ۱۱ ویژگی به عنوان ویژگی های بافتی محاسبه شد.

برای بدست آوردن ماتریس حاصل از الگوی دودویی محلی، ابتدا یک همسایگی از تصویر در نظر گرفته شده و شدت روشنایی نقاط موجود در این همسایگی با شدت روشنایی نقطه موجود در مرکز همسایگی مقایسه میشود، در صورتیکه مقدار شدت روشنایی هر پیکسل از پیکسل مرکزی بزرگتر و مساوی باشد، مقدار آن با عدد ۱ جایگزین میشود. در غیر اینصورت مقدار آن صفر خواهد بود. در پایان پیکسل مرکزی با جمع وزن دار دودویی پیکسل های همسایه جایگزین میشود و پنجره همسایگی به پیکسل بعدی منتقل میشود (Mollazade *et al.*, 2013). در نهایت ۸ ویژگی از ماتریس های دودویی محلی استخراج شده از تصاویر بدست آمد. مجموعاً ۴۱ ویژگی برای هر ۱۰۰ تصویر شامل ویژگی های ماتریس های هم وقوعی سطح خاکستری، طول گام سطح خاکستری و الگوی دودویی محلی بدست آمد که جزئیات آن در جدول ۱ ارائه شده است.

در تحلیل موجک یک روش پنجره گذاری متغیر، با یک پنجره بسامدی و مکانی متغیر، جهت آشکار سازی محتوای بسامدی در هر موقعیت مکانی از تصویر بکار میرود. در این روش سیگنال به نسخه های انتقال یافته و مقیاس بندی شده از موجک اصلی و مادر تجزیه میشود. نتایج حاصل از هر مقیاس و موقعیت را ضرایب موجک می نامند. تبدیل موجک یک تصویر با استفاده از بانک های فیلتر انجام میگردد. تبدیل موجک یک تصویر به صورت دو بعدی، چهار سری ضریب در هر سطح تجزیه ایجاد میکند. این چهار سری ضریب موجک با اسامی تقریب، جزئیات افقی، جزئیات عمودی و جزئیات قطری بدست می آیند (Gonzales *et al.*, 2004). سه ضریب آخر بیانگر لبه های تصویر در راستای افقی، عمودی و قطری هستند. در تحقیق حاضر ابتدا ضرایب تبدیل گسسته موجک محاسبه شدند. تجزیه موجک با استفاده از موجک مادر دابوچی درجه چهار (db4) انجام گردید. در نهایت ۱۶ ویژگی شامل میانگین، انحراف معیار، انرژی و آنتروپی بدست آمد.

**جدول ۱ - ویژگی های هدف برای استخراج از روش های مختلف تحلیل بافتی تصاویر**

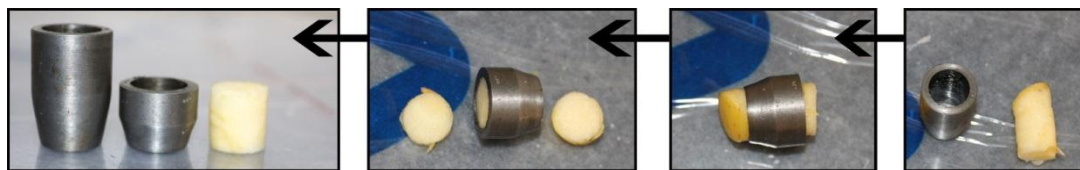
نام ویژگی استخراج شده	نوع روش تحلیل بافتی	
Uniformity (energy)	Mean gray level	
Entropy	Standard deviation	الگوی دودویی محلی (LBP)
Kurtosis (4th moment)	Smoothness	(Ojala et al., 2002)
Coefficient of variation	Skewness	
Sum average	Autocorrelation	
Sum variance	Contrast	
Sum of squares: Variance	Correlation	
Difference variance	Cluster Prominence	
Difference entropy	Cluster Shade	
Information measure of correlation 1	Dissimilarity	
Information measure of correlation 2	Energy	
Inverse difference (INV)	Entropy	
Inverse difference normalized	Homogeneity	
Inverse difference moment normalized	Maximum probability	
High gray level run emphasis (HGRE)	Sum entropy	
Short run low gray level emphasis (SRLGE)	Short run emphasis (SRE)	
Short run high gray level emphasis (SRHGE)	Long run emphasis (LRE)	
Long run low gray level emphasis (LRLGE)	Gray level non- uniformity (GLNU)	ویژگی های ماتریس طول گام سطح خاکستری (GLRLM)
Long run high gray level emphasis (LRHGE)	Run length non-uniformity (RLNU)	(Tang, 1998)
High gray level run emphasis (HGRE)	Run percentage (RP)	
	Low gray level run emphasis (LGRE)	

ویژگی های ماتریس هم وقوعی سطح خاکستری (GLCM) (Soh and Tsatsoulis, 1999)

### اندازه گیری خواص مکانیکی

برای تعیین خواص رئولوژی و مکانیکی سیب توسط آزمون فشار از دستگاه شرکت سنتام (مدل STM-20) مجهز به نیروسنج ۵۰۰ نیوتنی استفاده شد. نمونه استوانه ای با ابعاد معین روی یک سطح صلب قرار گرفت و توسط فک متحرک با نیرو و

سرعت مشخص بارگذاری شد. به منظور تهیه نمونه های استوانه ای ابتدا از یک لوله استیل به قطر ۳۰ و ارتفاع ۱۵ میلی متر برای برش نمونه با قطر ثابت از منطقه میانی بافت سیب و سپس از لوله استیل دوم برای قطع دو سر نمونه استوانه ای به منظور برش با تیغ تیز در ارتفاع معین ۱۵ میلی متر استفاده شد. لبه برنده هر دو لوله با دقت زیادی تیز شده بودند. نمونه ها از یک نقطه تصادفی در قسمت میانی میوه استخراج شدند. به جهت خارج کردن نمونه ها از درون لوله ها نیز از یک میله با دو سر صاف با قطر ۱۲ میلی متر و فشار دست استفاده شد (شکل ۲). لازم به ذکر است که طبق پژوهش های انجام شده اثر موقعیت های مختلف روی استوای میوه برای استخراج نمونه در خواص مکانیکی اختلاف معناداری ندارد (Abbott and Lu, 1996; مسعودی و همکاران، ۱۳۸۵).



شکل ۲ - فرآیند برش نمونه استوانه ای با ابعاد معین ۱۵ در ۱۵ میلی‌متر

سرعت بارگذاری در آزمون برابر با ۲۵/۴ میلی متر بر دقیقه تنظیم (ASABE, 2008) و نمونه استوانه ای بین دو فک دستگاه قرار داده شد. همزمان با شروع آزمون فشار، نرم افزار مربوط به دستگاه، منحنی نیرو - جابجایی محصول را رسم و داده های هر لحظه را ثبت میکرد. در آزمون فشار تک محوری ویژگی های مکانیکی ضریب الاستیسیته، تنش، کرنش و انرژی گسیختگی و چقرمگی از نمودار نیرو - تغییر شکل و تنش - کرنش بدست آمدند. با برازش یک چندجمله ای درجه سه (رابطه ۱) با داده های منحنی نیرو - تغییر شکل مقادیر شیب لحظه ای مورد نیاز در رابطه ۲ بدست آمد. به دلیل غیر خطی بودن منحنی نیرو - تغییر شکل بافت سیب مدول الاستیسیته مماسی مطابق تراکم های ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد محاسبه شد (Solomon and Jindal, 2007).

$$F(\Delta L) = a_0 \cdot \Delta L + a_1 \cdot \Delta L^2 + a_2 \cdot \Delta L^3 \quad (1)$$

$$E_a = \left( \frac{F/A}{\Delta L/L} \right) = \frac{dF}{d(\Delta L)} \Big|_{\%comp.} \cdot \left( \frac{L}{A} \right) \quad (2)$$

در رابطه بالا، A مساحت سطح مقطع استوانه ای نمونه ( $mm^2$ )، F نیرو (N)، L طول نمونه (mm)،  $\Delta L$  تغییر شکل در رابطه با،  $a_i$  ها مقادیر ثابت و  $E_a$  ضریب الاستیسیته در آزمون محوری (Pa) هستند. مقادیر تنش با تقسیم مقدار نیروی هر نقطه به مساحت سطح مقطع و کرنش آن با تقسیم به طول اولیه نمونه استوانه ای بدست آمدند. تنش و کرنش گسیختگی به ترتیب از تنش و کرنش متناظر با نقطه گسیختگی در نمودار تنش - کرنش بدست آمد. همچنین انرژی گسیختگی و مقدار چقرمگی به ترتیب



از محاسبه سطح زیر منحنی های نیرو - جابجایی و تنش - کرنش هر نمونه حاصل شد. روش آزمون فوق برای ۱۰۰ نمونه سیب تکرار شد.

### توسعه مدل های پیش بینی کننده

هدف این بخش پیش بینی خواص مکانیکی مطلوب در سیب است. پیش بینی خواص مکانیکی توسط سیستم تطبیقی استنتاج عصبی - فازی یا ANFIS<sup>۱</sup> صورت گرفت. این سیستم از مزایای شبکه های عصبی مصنوعی و سیستم تطبیقی قانون مبنای فازی برای این منظور استفاده میکند. جعبه ابزار منطق فازی در نرم افزار MATLAB برای ساختن مدل ANFIS مورد استفاده قرار گرفت و مجموعه ویژگی های نرمال شده (در بازه ۰ تا ۱) حاصل از تصویر THSP به عنوان ورودی و خواص مکانیکی نمونه به عنوان خروجی در نظر گرفته شدند. با نظر به اینکه هنگام افزایش تعداد ورودی ها به بیش از سه عدد، سیستم ANFIS از نظر زمانی و مقدار حافظه مصرفی رایانه مستعد نفرین ابعادی میشود، و به همین ترتیب افزایش مجموعه های فازی در متغیر ورودی زمان نیز به صورت تصاعدی افزایش پیدا میکند، فرآیند مؤثر برای کاهش ابعاد بردار ورودی استفاده از روش تحلیل مولفه های اصلی (PCA) است. این روش پیشتر نیز توسط محققانی مورد استفاده قرار گرفته است (Mollazade *et al.*, 2013). بنابراین تعداد ورودی ها با روش PCA کاهش می یابد و تنها سه مؤلفه اصلی اول در سیستم ANFIS تغذیه میشوند. به دلیل اینکه کارایی مدل ANFIS به شدت وابسته به ساختار آن است، به منظور یافتن بهترین مدل برای پیش بینی خواص مکانیکی سیب، چهار تنظیم مؤثر در ساختار ANFIS مورد استفاده قرار گرفت. تنظیم ها شامل تعداد توابع ورودی از ۲ تا ۵ تابع عضویت، نوع تابع ورودی (مثلی، دوزنقه ای، زنگی، گاوسی، ضرب دو تابع سیگموئیدی، گاوسی تعمیم یافته، پی شکل و تفاضل دو تابع سیگموئیدی)، نوع تابع عضویت خروجی (ثابت و خطی) و روش بهینه سازی (هیبریدی و پس انتشار) بودند. هر مدل ANFIS (۹ خاصیت مکانیکی  $\times$  ۲ روش بهینه سازی  $\times$  ۲ تابع عضویت خروجی  $\times$  ۸ تابع عضویت ورودی  $\times$  ۴ نوع تابع عضویت = ۱۱۵۲ مدل) با تنظیمات اختصاصی به تعداد ۱۰ بار اجرا و بهترین مدل با معیار های آماری استخراج شده از هر اجرا برای هر خاصیت مکانیکی حاصل شد.

به منظور جلوگیری از بیش یادگیری<sup>۲</sup> در مدل ها، و رسیدن به بهترین نتایج، داده ها به صورت تصادفی به سه دسته جداگانه تقسیم شدند. ۸۰ درصد داده ها برای یادگیری، ۱۰ درصد برای ارزیابی تقاطعی<sup>۳</sup> و مابقی داده ها برای پیش بینی به صورت مستقل مورد استفاده قرار گرفتند. مدل ها توسط داده های یادگیری ساخته و با ارزیابی تقاطعی بر فرآیند آموزش آنها نظارت شد. سپس مدل برای پیش بینی بخشی از داده های مستقل نیز استفاده شد. مدل ها با پارامتر های خطای جذر میانگین مربعات در

<sup>1</sup> Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

<sup>2</sup> Over-training

<sup>3</sup> Cross validation

ارزیابی تقاطعی RMSECV و در مرحله پیش بینی RMSEP، ضرایب تبیین در کالیبراسیون Rc و پیش بینی Rp و خطای بایاس میانگین در کالیبراسیون MBECV و پیش بینی MBEP ارزیابی شدند.

### نتایج و بحث

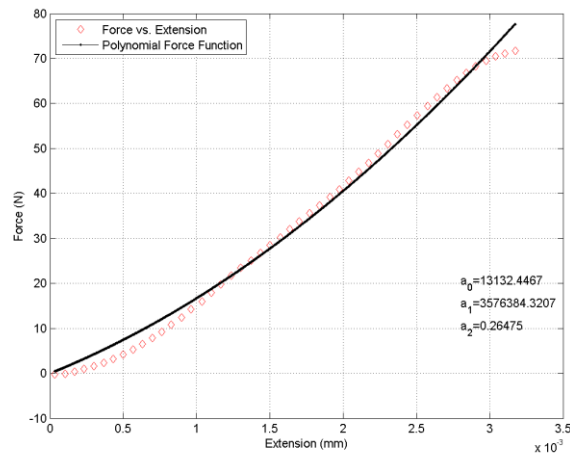
#### نتایج آزمون های مکانیکی

نتایج مقادیر آماری (میانگین، حداکثر، حداقل و انحراف معیار) برای اندازه گیری های خواص مکانیکی در جدول ۲ ارائه شده است. از منحنی های حاصل از آزمون فشار تک محوره، مدول الاستیسیته سکانتی بر طبق گرادیان شیب خطی اولیه محاسبه شد. این ویژگی برای تعیین خواص رئولوژیکی مواد ضروری است ( Bu-Contreras and Rao, 2002; Ramana and Taylor, 1992). سطح زیر منحنی نیرو - جابجایی در فاصله صفر تا نقطه تسلیم زیستی برای تعیین کار آزمون فشاری تک محوره یا همان چقرمگی در نظر گرفته شد (شکل ۳).

جدول ۲ - نتایج حاصل از آزمون های مکانیکی

انحراف معیار	حداقل	حداکثر	میانگین	ویژگی	
۰/۴۰۰	-۰/۱۶۶	۱/۷۲۲	۰/۴۳۳	%۲/۵	
۰/۴۲۲	-۰/۰۴۰	۱/۹۰۹	۰/۰۸۵	%۵	مدول الاستیسیته مماسی
۰/۴۵۹	۰/۰۲۳	۲/۴۸۸	۱/۲۱۴	%۷/۵	(مگاپاسکال)
۰/۴۹۵	۰/۰۶۶	۲/۸۷۶	۱/۵۳۴	%۱۰	
۰/۳۸۶	۰/۴۰۰	۲/۴۹۰	۱/۶۸۰		مدول الاستیسیته سکانتی
۰/۰۹۸	۰/۲۵۰	۰/۷۴۰	۰/۵۰۴		تنش تسلیم (مگاپاسکال)
۰/۰۹۸	۱۶/۷۲۰	۹۵/۲۶۰	۳۲/۷۲۰		کرنش تسلیم (%)
۰/۰۲۸	۰/۰۲۶	۰/۲۲۲	۰/۰۷۷		چقرمگی (میلی ژول بر میلی متر مکعب)

فشار تک محوره



شکل ۳ - نمونه منحنی نیرو - جابجایی برای نمونه استوانه ای تحت فشار به همراه منحنی برازش شده چند جمله ای

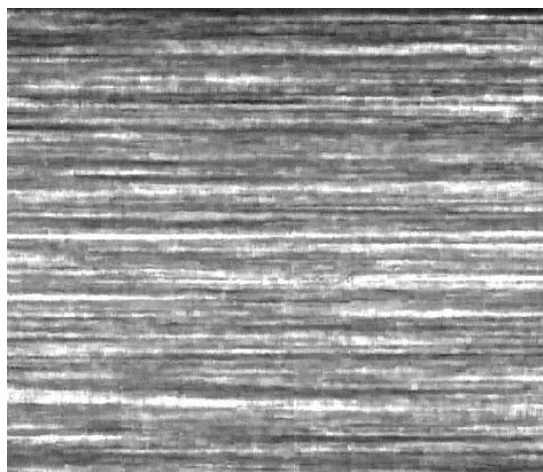
### نتایج مدل های پیش بینی

مدل های فازی ساخته شده از اندازه گیری های تخریبی (آزمون های مکانیکی) و غیر مخرب (تصاویر پیسه زیستی) توسط سیستم ANFIS بررسی شدند. بهترین نتیجه از اندازه گیری های آماری مدل ها برای پیش بینی خواص مکانیکی سیب های درختی در جدول ۳ ارائه شده است. در این جدول بهترین پیش بینی از هر ویژگی مکانیکی با ضریب تبیین، RMSE و خطای بایاس میانگین MBE در کالیبراسیون و مرحله پیش بینی نشان داده شده است. با مقایسه همه روش های بررسی بافتی، تبدیل موجک و روش GLRLM نتایج خوبی را برای بیشتر ویژگی ها به منظور انتخاب آنها به عنوان بهترین روش برای پردازش و بررسی و تحلیل تصاویر پیسه زیستی به دلیل ثبات آنها در بازده فرآیند پیش بینی ارائه کرده اند. این نشان دهنده اینست که پدیده نقاط تاریک و روشن در تصاویر پیسه زیستی به وضوح مرتبط به خواص مکانیکی سیب است. همچنین، کارایی خوب ویژگی های GLRLM را میتوان به تغییرات بزرگ مقادیر طول گام در تصاویر پیسه زیستی در هنگام تغییر خواص مکانیکی سیب مربوط دانست. طبق نتایج بدست آمده مدل پیش بینی برای کرنش شکست (۰/۹۲۰) و به دنبال آن برای مدول الاستیسیته مماسی در تراکم ۱۰ درصد (۰/۸۸۰) بیشترین ضریب تبیین و برای مدول الاستیسیته مماسی در تراکم ۵ درصد کمترین ضریب تبیین (۰/۷۷۸) را داشت.

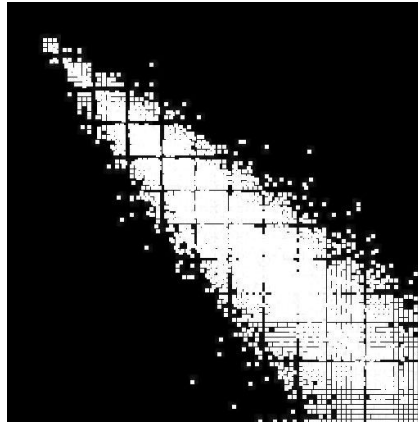
جدول ۳ - نتایج بررسی و استخراج بهترین مدل های پیش بینی برای هر خاصیت مکانیکی به همراه ویژگی های مدل

ویژگی مکانیکی	روش تحلیل یافت	تابع عضویت			روش بهینه سازی	کالیبراسیون					پیش بینی
		نوع ورودی	نوع خروجی	تعداد ورودی		RMSECV	MBE <sub>C</sub>	R <sub>c</sub>	RMSEP	MBE <sub>P</sub>	
چقرمگی	GLRLM	مثالی	خطی	۲	پس انتشار	۰/۰۲۹	۰/۰۰۷	۰/۷۳۲	۰/۰۰۵	۰/۰۱۱	۰/۸۶۹
تنش شکست	تبدیل موجک	سیگموییدی تفاضلی	ثابت	۳	پس انتشار	۰/۰۹۱	۰/۰۳۴	۰/۷۳۲	۰/۰۲۰	۰/۰۶۷	۰/۸۳۲
کرنش شکست	GLCM	پی شکل	ثابت	۳	هیبریدی	۰/۰۴۷	۰/۰۱۶	۰/۷۳۰	۰/۰۱۰	۰/۰۱۶	۰/۹۲۰
مدول الاستیسیته	تبدیل موجک	گوسی تعمیمی	ثابت	۲	پس انتشار	۰/۰۶۰	۰/۱۱۰	۰/۸۵۱	۰/۰۵۶	۰/۰۷۱	۰/۸۲۱
	تبدیل موجک	زنگی	ثابت	۳	پس انتشار	۰/۰۸۷	۰/۰۴۳	۰/۷۰۹	۰/۱۲۰	۰/۰۹۹	۰/۷۷۸
	GLRLM	زنگی	ثابت	۲	پس انتشار	۰/۰۲۸	۰/۱۱۰	۰/۷۹۸	۰/۰۲۰	۰/۱۳۰	۰/۷۹۱
	GLCM	پی شکل	خطی	۳	هیبریدی	۰/۰۷۲	۰/۱۶۶	۰/۷۸۳	۰/۰۳۴	۰/۰۷۴	۰/۸۸۰
	GLRLM	پی شکل	خطی	۳	پس انتشار	۰/۰۶۷	۰/۰۱۶	۰/۷۰۲	۰/۰۲۳	۰/۱۴۳	۰/۸۴۳

الگوی پیسه زیستی در طول موج ۷۸۰ نانومتر در شکل ۴ ارائه شده است. در این شکل به وضوح تغییرات زمانی الگوی پیسه قابل مشاهده است. این تصویر از ۵۰۰ پیکسل ستونی به عنوان پیسه ها و ۴۰۰ پیکسل افقی به عنوان تغییرات زمانی پیسه ها ساخته شده است. همچنین در شکل ۵، تراکم مقادیر غیر صفر حول قطر اصلی ماتریس هم وقوعی قابل مشاهده است.



شکل ۳ - الگوی پیسه زیستی در طول موج ۷۸۰ نانومتر



شکل ۴ - تراکم مقادیر غیر صفر حول قطر اصلی ماتریس هم وقوعی

مقدار ضریب تبیین پیش بینی مدل‌ها برای ویژگی مدول الاستیسیته برای نسبت تراکم  $2/5$  تا  $10$  درصد و همچنین مدول سکانتی به ترتیب برابرند با  $0/821$ ،  $0/778$ ،  $0/791$ ،  $0/880$  و  $0/843$ . این نتایج بدست آمده با نتایج بقیه محققینی که از سامانه‌های تصویر برداری لیزری به منظور این هدف استفاده کردند مقایسه شد. ملازاده و همکاران در سال  $2013$  سامانه تصویربرداری پس پراکنش لیزری را برای محاسبه و پیش بینی سفتی میوه‌های باغی به کار بردند (در طول موج  $660$  نانومتر و اندازه گیری سفتی با دستگاه بافت سنج). آنها مقدار  $0/861$  را به عنوان  $R_p$  حداکثر گزارش کردند. لافونتته و همکاران در همان سال به مقدار  $0/870$  برای سفتی رسیدند. لوو در سال  $2004$  به مقدار  $0/830$  رسیده بود. همه آنها از روش اندازه گیری نفوذ مگنس - تیلور (MT) با دستگاه آزمونگر بافت برای اندازه گیری سفتی استفاده کرده اند. در پژوهش کینگ و همکاران برای تخمین سفتی سیب با وارپته متفاوت مقدار بالای ضریب تبیین  $0/900$  گزارش شده است. آنها از طول موج های  $680$ ،  $780$ ،  $880$  و  $980$  نانومتر برای لیزر به عنوان منبع نوری استفاده کردند. در پژوهشی دیگر نشان داده شد که سفتی و فعالیت پیسه زیستی با رابطه خطی ( $0/89$ ) با استفاده از لیزر با طول موج  $635$  نانومتر با هم ارتباط داشتند. به وضوح نتایج این تحقیق‌ها و پژوهش حاضر چشم گیر و نشان دهنده پتانسیل مناسب استفاده از سامانه‌های تصویر برداری لیزری و خصوصاً پیسه زیستی برای پیش بینی خواص مکانیکی میوه‌ها خصوصاً سیب است. البته تفاوت‌ها ناشی از اختلاف در شرایط و ویژگی‌های آزمایشگاه، نمونه‌ها و روش‌های تحلیل است.

### نتیجه گیری

روش توصیف شده و استفاده شده لیزری فوق مبتنی بر پیسه زیستی نشان داد که این روش یک روش قابل توجه و مناسب و همچنین غیر مخرب برای رسیدن به خواص مکانیکی است. نتایج ارزیابی نشان داد که تصویربرداری پیسه زیستی می‌تواند خواص مکانیکی را با دقت مناسب و کافی پیش بینی کند. اگر چه نتایج ارائه شده در بالا می‌تواند اساس توسعه‌های سامانه‌های آینده در ارزیابی بر خط کیفی محصولات غذایی نیز باشد.



## منابع

مسعودی حسن، س. ا. طباطبایی فر، ع. م. برقی، و شاه بیگ م. ع. ۱۳۸۵. تعیین خواص مکانیکی سه رقم سیب صادراتی پس از پنج ماه انبارداری. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. جلد ۷. شماره ۲۷

Abbott JA, Lu R. 1996. Anisotropic mechanical properties of apple. *Trans. of the ASAE*: 1451-1459.

Adamiak A, Zdunek A, Kurenda A, Rutkowski K. 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.

Alamar MC, Vanstreels E, Oey ML, Molto' E, Nicolai BM. 2008. Micromechanical behaviour of apple tissue in tensile and compression tests: Storage conditions and cultivar effect. *Journal of Food Engineering* 86: 324–333.

Arefi A, Moghaddam PA, Hassanpour A, Mollazade K, Motlagh AM. 2016. Non-destructive identification of mealy apples using biospeckle imaging. *Postharvest Biology and Technology* 112: 266-276.

Arizaga R, Trivi M, Rabal H. 1999. Speckle time evolution characterization by the co-occurrence matrix analysis. *Opt. Laser Technol.* 31: 163–169.

Baranyai L, Zude M. 2009. Analysis of laser light propagation in kiwifruit using backscattering and Monte Carlo simulation. *Computer and Electronics in Agriculture* 69: 33–39.

Braga RA, Rabelo GF, Granato LR, Santos EF, Machado JC, Arizaga R, Rabal HJ, Trivi M. 2005. Detection of fungi in beans by the laser biospeckle technique. *Biosyst. Eng.* 91: 465–469.

Cena H, Lub R, Mendozab F, Beaudryc RM. 2013. Relationship of the optical absorption and scattering properties with mechanical and structural properties of apple tissue. *Postharvest Biology and Technology* 85: 30–38.

Cho Y. 1999. Firmness parameters for evaluation of apple freshness. Paper presented at KSAM 1999 Winter Conferences, Korean SOC. Agr. Machinery, Suwon, Korea.



Cho Y, Han YJ, Lee J. 1997. Feasibility of laser vision for evaluating fruit quality. Food Engineering Progress (Korea) 1: 137- 142.

Duprat F, Chen H, Grotte M, Loonis D, Pietri E. 1995. Laser light based machine vision system for nondestructive ripeness sensing of Golden apples. Pages 85-91. 1st IFAC/CIGR/EURAGENG/ISHS Workshop on Control Applications in Post-harvest and Processing Technology.

Engineering ASoA. 2008. ASAE Standard R2008. Compression Test Of Food Material Of Convex Shape: ASAE.

Gonzalez RC, Woods RE, Eddins SL. 2004. Digital Image Processing Using MATLAB. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

Holt JE, Schoorl D. 1984. Mechanical Properties And Texture Of Stored Apples. Journal of Texture Studies 15: 377-394.

Lafuente V, Val J, Urzola C, Negueruela I. 2013. Determination of quality parameters in apple ‘Smoothie Golden Delicious’ using backscattering laser imaging. 8th Iberoamerican Optics Meeting and 11th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Applications. University of Porto. Faculty of Sciences, Porto, Portugal.

Lu R. 2004. Multispectral imaging for predicting firmness and soluble solids content of apple fruit. Postharvest Biology and Technology 31: 147–157.

Masoudi H, Tabatabaeefar A, Borghae AM. 2007. Determination of storage effect on mechanical properties of apples using the uniaxial compression test. Canadian Biosystems Engineering 49: 3.29-23.33.

Mendoza F, Lu R, Cen H. 2012. Comparison and fusion of four nondestructive sensors for predicting apple fruit firmness and soluble solids content. Postharvest Biology and Technology 73: 89–98.

Mollazade K, Omid M, Tab FA, Kalaj YR, Mohtasebi SS, 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.

- Noh HK, Lu R. 2007. Hyperspectral laser-induced fluorescence imaging for assessing apple fruit quality. *Postharvest Biology and Technology* 43: 193–201.
- Ojala T, Pietikäinen M, Mäenpää T. 2002. Multiresolution grey-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns. *IEEE Trans. Pattern Anal.* 24: 971–987.
- Peng Y, Lu R. 2006. Improving apple fruit firmness predictions by effective correction of multispectral scattering images. *Postharvest Biology and Technology* 41: 266–274.
- 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.
- R. B-C, MA. R. 2002. Dynamic rheological behaviour of heated potatoes. *Food science and Technology International* 8: 3-10.
- Rahemi M. 2003. *Post-harvest physiology: An introduction to the physiology and handling of fruit, vegetables and ornamentals.* Shiraz.
- 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.
- S. R, A. T. 1992. Dynamic measurement of tissue rigidity during freezing and cooking of vegetables. *Science of Food and Agriculture* 58: 261-266.
- Soh L, Tsatsoulis C. 1999. Texture Analysis of SAR Sea Ice Imagery Using Gray Level Co-Occurrence Matrices. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 37.
- Solomon WK, Jindal VK. 2007. Modeling changes in rheological properties of potatoes during storage under constant and variable conditions. *LWT* 40: 170-178.
- Somers GF. 1965. Viscoelastic Properties of Storage Tissues from Potato, Apple, and Pear. *Journal of Food Science* 30: 922–929.
- Szymanska-Chargot M, Adamiak A, Zdunek A. 2012. Pre-harvest monitoring of apple fruits development with the use of the biospeckle method. *Sci. Hort.* 145: 23–28.



Tang X. 1998. Texture information in run-length matrices. *IEEE Trans. Image Process.* 7: 1602–1609.

Tscheuschner HD, Du D. 1988. Modelling of Mechanical Properties of Apple Flesh under Compressive Load. *Journal of Food Engineering* 8: 173- 186.

Tu K, Chen YY, Ren K, Shao XF, Dong QL, Pan LQ. 2006. Modeling apple quality changes based on laser scattering image analysis under simulated shelf life conditions. *ISHS Acta Horticulturae* 712: 371–379.

Varela P, Salvador A, Fiszman S. 2007. Changes in apple tissue with storage time: rheological, textural and microstructural analyses. *J. Food Eng* 78: 622–629.

Varela P, Salvador A, Fiszman S. 2007. Changes in apple tissue with storage time: Rheological, textural and microstructural analyses. *Journal of Food Engineering* 78: 622–629.

Xu Z, Joenathan C, Khorana BM. 1995. Temporal and spatial properties of the time-varying speckles of botanical specimens. *Opt. Eng.* 34: 1487–1502.

Zdunek A, Cybulska J. 2011. Relation of biospeckle activity with quality attributes of apples. *Sensors* 11: 6317–6327.

Zdunek A, Adamiak A, Pieczywek PM, Kurenda A. 2014. The biospeckle method for the investigation of agricultural crops: a review. *Opt. Laser Eng.* 52: 276–285.

Zhao Y, Wang J, Wu X, Williams FW, Schmidt RJ. 1997. Point-wise and whole-field laser speckle intensity fluctuation measurements applied to botanical specimens. *Opt. Lasers Eng.* 28: 443–456.