

کاربرد روش زیست لکه در ارزیابی کیفی محصولات کشاورزی؛ مقاله مروری

علیرضا سلیمانی پور^{۱*}، غلامرضا چگینی^۲

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۲- عضو هیئت علمی گروه مهندسی فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

* ایمیل نویسنده مسئول: asoleimani@ut.ac.ir

چکیده

کیفیت میوه ها و سبزیجات با گذشت زمان تغییر می کند زیرا این محصولات یک ارگانسیم زنده هستند که فرایندهای شیمیایی و فیزیکی بسیاری در آنها به طور مستمر اتفاق می افتد. تکنیک زیست لکه یک روش غیر تماسی، غیر مضر و غیر مخرب برای ارزیابی اشیاء زنده است. این روش برای پایش فرایندهای مربوط به حرکت ذرات مواد در صنایع پزشکی، کشاورزی و میکروبیولوژی مورد استفاده قرار می گیرد. پدیده زیست لکه زمانی اتفاق می افتد که یک ماده بیولوژیک در معرض نور لیزر قرار می گیرد. در سال های اخیر این روش به طور گسترده برای ارزیابی کیفی محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار گرفته است. کاربردهای مختلف این روش شامل پایش سن رشد و رسیدگی محصولات، توسعه ارگان های گیاهی و تشخیص و ارزیابی میزان پیشرفت آسیب ها و بیماری ها است. مزیت های این روش در پیاده سازی نسبتا آسان و کم هزینه، محققان مختلف را بر آن داشته تا در جهت توسعه کاربردهای آن، به خصوص در حوزه کنترل کیفی پیش از برداشت و پس از برداشت محصولات کشاورزی تلاش نمایند.

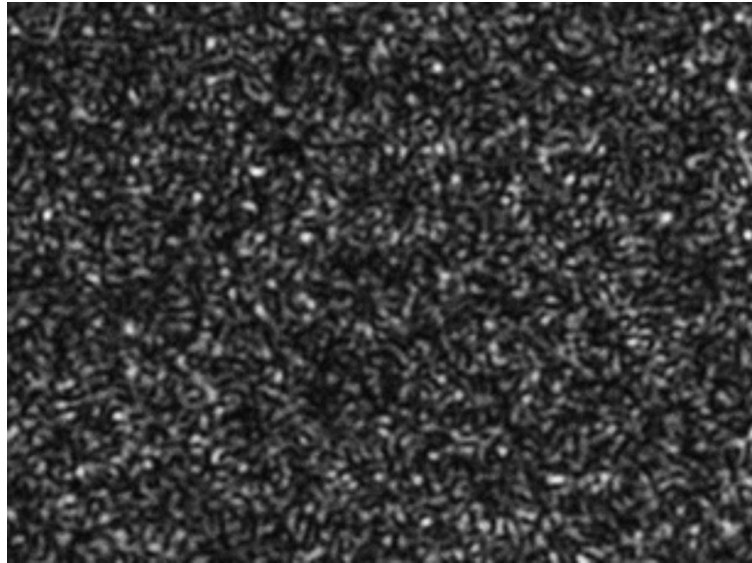
کلمات کلیدی: ارزیابی کیفی، تکنیک های غیرمخرب، زیست لکه، محصولات کشاورزی

۱. مقدمه

محققان زیادی از مشخصه‌های ظاهری به عنوان معیاری برای جداسازی میوه‌ها و سبزیجات تازه استفاده کرده‌اند. در عمل نیز از بررسی شکل، اندازه و رنگ برای تعیین میزان کیفیت ظاهری محصول، و روش‌هایی نظیر فشردن بین انگشت‌ها یا دست، فشار انگشت شست به گوشت میوه، گاز زدن یا جویدن، برای اندازه‌گیری سفتی استفاده می‌شود. به دلیل متغیر بودن نتیجه این روش‌ها از نظر افراد مختلف، و طبیعت زمان‌بر و مخرب برخی از آنها و تأکید زیاد روی کیفیت، روش‌های غیر مخرب برای اندازه‌گیری و تعیین کیفیت سریع میوه‌ها در حال توسعه است (Stone *et al.*, 1998). یکی از مزایای روش‌های غیر مخرب این است که اندازه‌گیری‌ها می‌تواند به دفعات روی میوه‌های مشابه صورت گیرد. در چند سال اخیر روش‌های آزمون غیر مخرب با موفقیت برای اندازه‌گیری کیفیت محصولات مختلف کشاورزی به کار رفته است.

اندازه‌گیری برخط و غیر مخرب کیفیت بافت میوه‌ها و سبزیجات یک هدف دشوار و در عین حال چالش‌برانگیز برای بسیاری از محققان بوده است. توسعه فناوری‌های مبتنی بر میکرو الکترونیک، فناوری اطلاعات و شیوه‌های تحلیل داده تأثیر بسزایی در رشد و پیشرفت این بخش در طی دهه اخیر داشته است (Ragni *et al.*, 2010). مشخصه‌های بافتی میوه توسط روش‌های مختلفی از قبیل روش تصویر برداری پس پراکنش نور لیزر^۱ (Lu, 2004; Qing *et al.*, 2008)، اندازه‌گیری پاسخ آکوستیکی به ضربه (Duprat *et al.*, 1997; Schotte *et al.*, 1999; Pathaveerat *et al.*, 2008)، پاسخ به تغییر شکل‌های کوچک یا نیرو-جابجایی (Harrison, 2003; Howarth *et al.*, 2003; Barreiro *et al.*, 2004)، اندازه‌گیری خواص نوری، در طول موج‌های فرو سرخ نزدیک و طیف مرئی-فرو سرخ نزدیک^۲ (Liu *et al.*, 2008; Park *et al.*, 2003; Lemmertyn *et al.*, 1988; Philip *et al.*, 2014)، روش‌های فراصوت (Mizrach *et al.*, 1999; Mizrach, 2007; Kim *et al.*, 2009)، تصویر برداری چند طیفی^۳ و فرا طیفی^۴ (Gowen *et al.*, 2007; Vanoli *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2012) می‌تواند تخمین زده شود. زیست لکه^۵ تکنیک نوری دیگری است که حدود بیست سال پیش برای ارزیابی غیر مخرب مواد بیولوژیک معرفی شد (Xu *et al.*, 1995; Zhao *et al.*, 1997; Zdunek *et al.*, 2014). در این روش، یک نور لیزر همسان روی شیء مورد نظر تابانده می‌شود. نور بازتاب شده یک الگوی لکه^۶ خاصی را در یک صفحه نمایش ایجاد می‌کند (شکل ۱). اگر نمونه مورد نظر هیچ فعالیت فیژیولوژیکی از خود نشان ندهد، الگوی لکه در طول زمان پایدار خواهد بود (Xu *et al.*, 1995).

-
- 1- Laser-light backscattering imaging
 - 2- VIS-NIR
 - 3- Multispectral
 - 4- Hyperspectral
 - 5 - Biospeckle
 - 6 - Speckle pattern



شکل ۱. تصویری از الگوی لکه در میوه سیب

هر چند، در مورد نمونه های بیولوژیک زنده، الگوی لکه حاوی دو جزء است: یک جزء پایای ناشی از اجزای بی حرکت شیء مورد نظر و یک جزء متغیر با زمان، که حاصل از ذرات متحرک درون نمونه است. مشخصه بافت فعال، به لحاظ فیزیولوژیکی، این الگوی لکه پویا زیست لکه (بیو اسپکل) نامیده می شود (Zhao *et al.*, 1997; Xu *et al.*, 1995). تا کنون، کارهای تحقیقاتی به منظور بررسی کاربرد روش زیست لکه در مطالعات بیولوژیک انجام شده است که شامل اندازه گیری جریان خون در رگ های خونی (Briers and Fercher, 1982)، زیست پذیری بذرها (Braga *et al.*, 2003; Sendra *et al.*, 2005)، فعالیت انگل ها در بافت های زنده (Pomarico *et al.*, 2004; Braga *et al.*, 2005)، تحلیل رسیدگی و کبودی در میوه ها و سبزیجات (Xu *et al.*, 2005; Rabelo *et al.*, 2003; Pajuelo *et al.*, 1995)، پایش ماندگاری میوه ها (Zdunek *et al.*, 2007; 2008) و بررسی محتوای کلروفیل (Zdunek and Herppich, 2012) می شود.

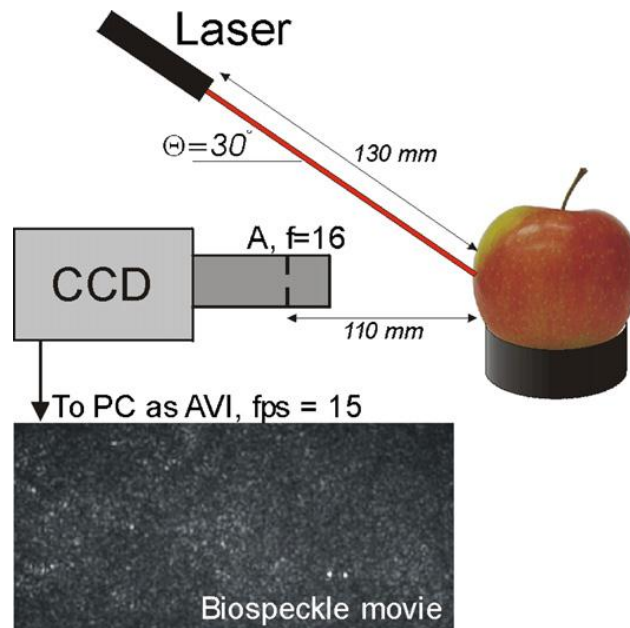
پیش از این، فرایندهای مربوط به حرکت مراکز پراکندگی در بافت همچون جریان سیتوپلاسمی، جنبش اندامک، رشد و تقسیم سلول طی رسیدن میوه، و واکنش های بیوشیمیایی بررسی شده است و نتیجه گیری شده است که این موارد به دلیل فعالیت های زیست لکه ای خاصی هستند (Braga *et al.*, 2009). حرکات نامنظم و تصادفی (براونی) لکه ها به عنوان منبع فعالیت زیست لکه ای در نظر گرفته می شود (Zhao *et al.*, 1997). در حال حاضر دانش موجود در مورد ارتباط زیست لکه با میوه ها و سبزیجات هنوز محدود است. به طور کلی، مطالعات بالا نشان می دهد که فعالیت زیست لکه (پویایی زیست لکه) با مراحل رشد و نمو شیء بیولوژیک تغییر می کند. همچنین فعالیت زیست لکه می تواند در پاسخ به تغییر در برخی خصوصیات سطح شیء، برای مثال پیشرفت کبودی یا بیماری ها، تغییر کند. به عبارت دیگر، نبود تفاسیر بیولوژیکی نامتناقض در مورد این پدیده به طور آشکار احساس می شود. از این رو، کاربرد این روش در تحقیقات کشاورزی و باغبانی و یا حتی اجرای عملیاتی آن در این حوزه ها هنوز مشکل ساز است.

۲. پیاده سازی

یک شکل شماتیک از سیستم مورد استفاده برای اندازه گیری فعالیت زیست لکه در شکل (۱) نشان داده شده است. این سیستم شامل یک لیزر دیود^۱ هلیوم-نئون با طول موج حدود ۶۳۲ نانومتر است که برای نورپردازی به نمونه استفاده می شود. نورپردازی باید به طور کامل یکنواخت انجام شود. بدین منظور از یک بسط دهنده پرتو^۲ استفاده می شود. فعالیت زیست لکه با استفاده از یک دوربین تصویری برداری (CCD) به صورت یک فیلم با تعداد حدود ۱۰ تا ۲۰ فریم در ثانیه ثبت می شود. هدف دوربین تصویری معمولاً تا حد زیادی تاری می شود. دیافراگم هدف دوربین اندازه لکه (d) را با توجه به رابطه (۱) تعیین می کند:

$$d = 1.22(\lambda z/D) \quad (1)$$

که در آن، λ طول موج نور لیزر است، z فاصله دوربین تا هدف و D قطر سطح نورپردازی شده می باشد. لکه های ایستای بزرگتر از سطح نشأت می گیرند که به زاویه انتشار نور بستگی دارد، از طرف دیگر لکه های پویای کوچک تر منتج از بافت داخلی مستقل از زاویه انتشار نور هستند. در اندازه گیری و ارزیابی زیست لکه می بایست طول موج نور لیزر، فاصله و زاویه بین نمونه و دوربین، قطبش (پلاریزاسیون) و شدت نور و دیافراگم هدف دوربین در نظر گرفته شود.



شکل ۲. پیاده سازی سیستم نورپردازی و ثبت تصویر برای اخذ تصاویر زیست لکه.

۳. تئوری ارزیابی زیست لکه

برای ارزیابی فعالیت زیست لکه از تکنیک های مختلفی استفاده می شود که این تکنیک ها بر روی داده های تصویری حاصل از سیستم زیست لکه اعمال می شوند. این تکنیک ها به دو دسته، مقیاس های کلی فعالیت لکه و تحلیل مکانی فعالیت زیست لکه

1 - Diode laser
2 - Beam expander



تقسیم بندی می شوند. مقیاس های کلی فعالیت لکه شامل سه روش، تباین مکانی و زمانی^۱، تاریخچه زمانی الگوی لکه^۲ (THSP) و تکنیک همبستگی مکانی- زمانی لکه^۳ می شود، در حالیکه تحلیل مکانی فعالیت زیست لکه مشتمل بر روش فوجی^۴، اختلاف تعمیم یافته^۵ (GD)، تحلیل تباین لکه لیزر^۶ (LASCA)، تصویر تاریخچه حرکت^۷ و تجزیه و تحلیل در حوزه های طیفی^۸ است. در ادامه دو روش ارزیابی پر کاربرد، تباین مکانی و زمانی، و تاریخچه زمانی الگوی لکه شرح داده شده اند.

۳-۱. تباین مکانی و زمانی

با فرض اینکه الگوی ایجاد شده توسط نور بازتاب شده از یک ماده بیولوژیک از ترکیب دو جزء تشکیل می شود، که یکی نور بازتاب شده از بازتاب کننده های پایا است و دیگری توسط بازتاب کننده های متحرک بازتاب می شود، برای یک مدت زمان نورپردازی نسبتاً طولانی، میانگین زمانی الگوی لکه بازتاب کننده های پایا در همه نقاط ثابت است. بنابراین، نواسانات شدت نور در الگوی لکه به صورت نسبت شدت میانگین نور از بازتاب کننده های متحرک به شدت کل نور بازتاب شده بیان می شود. این مقدار مطابق رابطه زیر بوده و با ρ نشان داده می شود:

$$\rho = 1 - \frac{\sigma}{\langle I \rangle} \quad (2)$$

که در آن σ^2 واریانس مکانی میانگین زمانی الگوی لکه است و $\langle I \rangle$ شدت نور میانگین الگوی لکه است. روی تصویر بدست آمده توسط این تکنیک ناحیه های با نواسانات لکه زیاد با توجه به سرعت نوسان تار شده و تباین مکانی این ناحیه ها کاهش می یابد. در ناحیه هایی که هیچ نوسانی وجود ندارد، تباین مکانی بالا می ماند. از طرف دیگر، با استفاده از یک دوربین دیجیتال (CCD) با قابلیت بررسی تک تک فریم های فیلم گرفته شده، روش دیگری برای میانگین گیری زمانی از فریم های یک فیلم بدست می آید که فریم میانگین از مجموعه فریم های یک فیلم محاسبه می شود. علاوه بر این، در مورد مجموعه فریم های نمونه گیری شده امکان کاربرد مستقیم آمار گیری زمانی وجود دارد، که در آن فرایند میانگین گیری زمانی با میانگین گیری مکانی جایگزین می شود. در این روش آمارگیری زمانی مرتبه اول از نوسانات موجود در شدت لکه در هر نقطه به طور مجزا محاسبه می شود. این مقیاس که تباین زمانی نامیده می شود به صورت زیر است:

$$\rho = 1 - \left[1 - \frac{\langle \sigma_t^2(x, y)_{x,y} \rangle}{\langle I \rangle^2} \right]^{0.5} \quad (3)$$

¹ - Spatioal and temporal contrast

² - Time history of the speckle patern

³ - Spatial-temporal speckle correlation technique

⁴ - Fujii's method

⁵ - Generalized difference

⁶ - Laser spackle contrast analysis

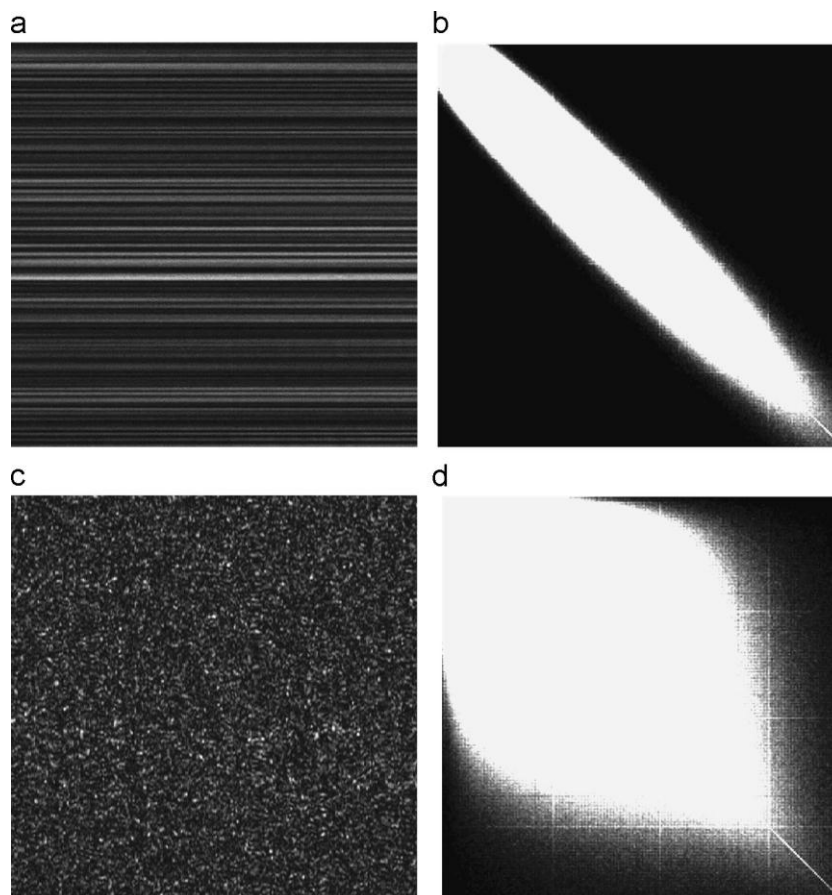
⁷ - Motion history image

⁸ - Analyses in spectral domains

که در آن $\sigma_t^2(x, y)$ واریانس زمانی نوسانات شدت در نقطه (x, y) الگوی لکه است و (x, y) به میانگین گیری مکانی اشاره دارد. مقدار $\langle I \rangle$ شدت نور میانگین الگو در حوزه زمانی و مکانی است. هر چند تباین های مکانی و زمانی مقادیر وابسته به سرعت هستند، اما هیچ اطلاعاتی در مورد سرعت لکه های متحرک یا محتوای فرکانسی نوسانات شدت نور ارائه نمی دهند. این تباین ها بزرگی نسبی نوسانات لکه را برآورد می کنند. در دو روش از آمار مرتبه اول نوسانات لکه استفاده می کنند، و تنها اطلاعاتی در مورد سهم نسبی پراکنده سازهای متحرک به همه الگوری لکه نوسان کننده بدست می دهند.

۲-۳. تاریخچه زمانی الگوی لکه (THSP)

در این روش یک ماتریس تشکیل می شود که درایه های آن تعدادی از تصاویر متوالی پدیده زیست لکه پویا است. این ماتریس با استفاده از یک ستون یکسان استخراج شده از هر تصویر و قرار گرفته در کنار هم ساخته می شود. مجموعه ستون ها به ترتیب زمانی کنار هم چیده می شوند. عرض ماتریس تشکیل شده برابر با تعداد تصاویر استفاده شده است و بیانگر مقیاس زمانی فعالیت زیست لکه است. برای مشخص کردن تغییر و تحول زمانی لکه از ممان اینرسی ماتریس (THSP) استفاده می شود (Zdunek et al., 2014)



شکل ۳. تصاویر مربوط به ماتریس تاریخچه زمانی الگوی لکه (a) مربوط به یک نمونه با فعالیت زیست لکه کم، (b) مربوط به

یک نمونه با فعالیت زیست لکه زیاد) و ماتریس هم رخدادی متناظر آنها (c و d). (Zdunek et al., 2014)



ماتریس هم رخدادی تصاویر (GLCM) ماتریسی است که در بردارنده اطلاعاتی در رابطه با ارتباط بین مقادیر پیکسل های مجاور در یک تصویر می باشد. ایم ماتریس از تصویر (THSP) ساخته می شود و فعالیت زیست لکه نمونه را به صورت مقادیر غیر صفر قرار گرفته در خارج از قطر اصلی ماتریس نشان می دهد. برای نمونه های با فعالیت زیست لکه کم، مقادیر ماتریس هم رخدادی در اطراف قطر متمرکز می شوند، در حالیکه برای نمونه با فعالیت بالا ماتریس شبیه یک ابر خواهد بود (شکل ۳). ممان اینرسی ماتریس هم رخدادی به صورت مجموع ضرب مقادیر ماتریس در مربع فاصله از قطر اصلی تعریف می شود. انتظار می رود که مقدار ممان اینرسی بالاتر به فعالیت زیست لکه بالاتر مرتبط باشد.

۴. نتیجه گیری

از آنجایی که تکنیک زیست لکه در بافت های بیولوژیک غیر مضر و غیر مخرب است، می تواند به عنوان ابزاری ارزشمند برای پایش فرایند های مختلف بیولوژیک در نظر گرفته شود. این روش در موارد متعددی و در حوزه های تحقیقاتی و کاربردی پزشکی اغلب به منظور اندازه گیری چرخش خون، و نیز میکروبیولوژی برای ارزیابی میزان تحرک باکتری ها به کار گرفته شده است. برای محصولات کشاورزی نیز مطالعاتی تا کنون به انجام رسیده است که از آن جمله می توان به کاربرد تحقیقاتی این روش در پایش سن رشد (پیش از برداشت محصول) و عمر ماندگاری (پس از برداشت محصول)، تشخیص بیماری ها و آسیب ها، و ارزیابی مراحل رشد و نمو گیاهان اشاره کرد. هر چند این روش ارزیابی کیفی در حال حاضر در مراحل اولیه توسعه خود در بخش کشاورزی قرار دارد، ولی این احتمال وجود دارد که در آینده به صورت تجاری پیاده سازی گردد. دستیابی به این مهم نیازمند انجام تحقیقات گسترده خواهد بود.

منابع

- Barreiro, P., Ruiz-Altisent, M., Valero, C., Garcia-Ramos, J., 2004. Fruit post-harvest technology: instrumental measurement of ripeness and quality. In: Dris, R., Jain, S.M. (Eds.), Production practices and quality assessment of food crops. Quality Handling and Evaluation, vol. 3. Kluwer Academic Publishers, New York, pp. 321–340.
- Braga Jr, R.A., DalFabbro, I.M., Borem, F.M., Rabelo, G., Arizaga, R., Rabal, H.J., 2003. Assessment of seed viability by laser speckle techniques. Biosyst Eng, 86, 287–294.
- Braga Jr., R.A., Rabelo, G.F., Granato, L.R., Santos, E.F., Machado, J.C., Arizaga, R., 2005. Detection of fungi in beans by the laser biospeckle technique. Biosyst Eng, 91, 465–9.



- Braga, R.A., Dupuy, L., Pasqual, M., Cardoso, R.R., 2009. Live biospeckle laser imaging of root tissues. *Eur Biophys J*, 38(5), 679–86.
- Briers, J.D., Fercher, A.F., 1982. Retinal blood-flow visualization by means of laser speckle photography. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 22, 255–9.
- Duprat, F., Grotte, M., Pietri, E., Loonis, D., 1997. The acoustic impulse response methods for measuring the overall firmness of fruit. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 66, 251– 259.
- Gowen, A., O'Donnell, C., Cullen, P., Downey, G., Frias, J. 2007. Hyperspectral imaging—An emerging process analytical tool for food quality and safety control. *Trends in Food Science and Technology*, 18(12), 590–598.
- Harrison, I., 2003. Non-destructive testing for fruit quality assurance. *Innovations in food technology*. Available in http://www.sinclair-intl.com/images/info_page/sinclair_iq_articles/Innovations_In_Food_Tech.pdf
- Howarth, M.S., Shmulevich, I., Raithatha, C., Ioannides, Y., 2003. Online nondestructive avocado firmness assessment based on low-mass impact technique. In: *Proceedings V World Avocado Congress (Actas V Congreso Mundial del Aguacate)*. pp. 679–685.
- Kim, K.-B., Lee, S., Kim, M.-S., Cho, B.-K., 2009. Determination of apple firmness by nondestructive ultrasonic measurement. *Postharvest Biology and Technology*, 52, 44–48.
- Lemmertyn, J., Nicolai, B., Ooms, K., De Smedt, V., De Baerdemaeker, J., 1998. Nondestructive measurement of acidity, soluble solid, and firmness of Jonagold apples using NIR-spectroscopy. *Transactions of the ASAE*, 41, 1089–1094.
- Liu, Y., Chen, X., Ouyang, A., 2008. Nondestructive determination of pear internal quality indices by visible and near-infrared spectrometry. *LWT – Food Science Technology*, 41, 1720–1725.
- Lu, R., 2004. Multispectral imaging for predicting firmness and soluble solids content of apple fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 31, 147–157.
- Mizrach, A., 2007. Nondestructive ultrasonic monitoring of tomato quality during shelf-life storage. *Postharvest Biology and Technology*, 46, 271–274.



- Mizrach, A., Flitsanov, U., Schmilovitch, Z., Fuchs, Y., 1999. Determination of mango physiological indices by mechanical wave analysis. *Postharvest Biology and Technology*, 16, 179–186.
- Pajuelo M, Baldwin G, Rabal H, Cap N, Arizaga R, Trivi M., 2003. Bio-speckle assessment of bruising in fruits. *Opt Laser Eng*, 40, 13–24.
- Park, B., Abbott, J.A., Lee, K.J., Choi, C.H., Choi, K.H., 2003. Near-infrared diffuse reflectance for quantitative and qualitative measurements of soluble solids and firmness of delicious and gala apples. *Transactions of the ASAE*, 46, 1721–1731.
- Pathaveerat, S., Terdwongworakul, A., Phaungsmbut, A., 2008. Multivariate data analysis for classification of pineapple maturity. *Journal of Food Engineering*, 89, 112–118.
- Philip, I., Rowe, P.I., Künnemeyer, R., McGlone, M., Talele, S, Martinsen, P., Seelye, R., 2014. Relationship between tissue firmness and optical properties of ‘Royal Gala’ apples from 400 to 1050 nm. *Postharvest Biology and Technology*, 94, 89–96.
- Pomarico, J.A., Di Rocco, H.O., Alvarez, L., Lanusse, C., Mottier, L., Saumell, C., 2004. Speckle interferometry applied to pharmacodynamic studies: evaluation of parasite motility. *Eur Biophys J*, 33(8), 694–9.
- Qing, Z., Ji, B., Zude, M., 2008. Non-destructive analyses of apple quality parameters by means of laser-induced light backscattering imaging. *Postharvest Biology and Technology*, 48, 215–222.
- Rabelo, G.F., Braga Jr., R.A., Fabbro, I.M.D., Arizaga, R., Rabal, H.J., Trivi, M.R., 2005. Laser speckle techniques in quality evaluation of orange fruits. *Rev Bras Eng Agríc Ambient*, 9, 570–5.
- Ragni, L., Berardinelli, A., Guarnieri, A., 2010. Impact device for measuring the flesh firmness of kiwifruits. *Journal of Food Engineering*, 96, 591-597.
- Schotte, S., De Belie, N., De Baerdemaeker, J., 1999. Acoustic impulse-response technique for evaluation and modeling of firmness of tomato fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 17, 105-115.
- Sendra, G.H., Arizaga, R., Rabal, H., Trivi, M., 2005. Decomposition of biospeckle images in temporary spectral bands. *Opt Lett*, 30(13), 1641–1643.



- Stone, M.I., Armstrong, P.R., Chen, D.D., Brusewitz, G.H., Maness, N.O., 1998. Peach firmness prediction by multiple location impulse testing. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 41(1), 115–119.
- Vanoli, M., Rizzolo, A., Grassi, M., Farina, A., Pifferi, A., Spinelli, L., 2011. Time-resolved reflectance spectroscopy nondestructively reveals structural changes in ‘Pink Lady’ apples during storage. *Procedia Food Science*, 1, 81–89.
- Wang, S., Huang, M., Zhu, Q., 2012. Model fusion for prediction of apple firmness using hyperspectral scattering image. *Computers and Electronics in Agriculture*, 80, 1–7.
- Xu, Z, Joenathan, C, Khorana, B.M., 1995. Temporal and spatial properties of the time-varying speckles of botanical specimens. *Opt Eng*, 34(5), 1487–502.
- Zdunek, A., Frankevych, L., Konstankiewicz, K., Ranachowski, Z., 2008. Comparison of puncture test, acoustic emission and spatial-temporal speckle correlation technique as methods for apple quality evaluation. *Acta Agrophysica*, 11, 303–15.
- Zdunek A., Herppich W.B., 2012. Relation of biospeckle activity with chlorophyll content in apples. *Postharvest Biol Technol*, 64, 58–63.
- Zdunek, A, Muravsky, L.I., Frankevych, L., Konstankiewicz, K., 2007. New nondestructive method based on spatial-temporal speckle correlation technique for evaluation of apples quality during shelf-life. *Int Agrophys*, 21, 305–10.
- Zdunek, A., Adamiak, A., Pieczywek, P.M., Kurenda, A., 2014. The biospeckle method for the investigation of agricultural crops: A review. *Optics and Lasers in Engineering*, 52, 276–285.
- Zhao, Y., Wang, J., Wu, X., Williams, F.W., Schmidt R.J., 1997. Point-wise and whole-field laser speckle intensity fluctuation measurements applied to botanical specimens. *Opt Laser Eng*; 28, 443–56.