دستیابی به سفتی میوه گلابی با استفاده از آنالیز طیف ارتعاشی

زهرا اویسی[1]، سعید مینایی[1]،شاهین رفیعی[2]. افشین ایوانی[3]. علیمحمد برقعی[1]

1- بخش مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

2- بخش مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج

2- موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، کرج

minoo.oveisi@gmail.com

چکیده

سفتی یک خاصیت کیفی مهم در تعیین کیفیت میوه قابل قبول برای مصرف کننده است و مرتبط با میزان رسیدگی میوه و شرایط نگهداری آن است. نگهداری گلابی بر فرآیند رسیدگی آن تاثیر می گذارد. اندازه گیری سفتی به طور سنتی بر اساس پروسه مگنس تیلور (M-T) با استفاده از آنالیز کننده بافت یا پنترومتر در آزمایشهای بافت مرجع انجام می شود. در این تحقیق، یک روش جدید با استفاده از تکنولوژی لیزر داپلر ویبرومتر (LDV) برای ارزیابی سفتی بافت بکار رفته است. بنابراین، مدل‌هایی پیوسته بر پایه متغیرهایی که از آزمون غیر مخرب بدست آمدند، حاصل شدند . پارامترهای بدست آمده از متد غیر مخرب با روش مخرب مرجع مقایسه شدند . از روش رگرسیون خطی چند متغیره برای تحلیل پاسخ طیف ارتعاش بکار برده شد. ضرایب رگرسیونی بر پایه پارامترهای غیر مخرب با دو پارامتر دامنه ارتعاش (Amp) و فاز (φ) بودند که ضریب همبستگی آن‌ها با ماکزیمم نیرو در تست مگنس تیلور R^2=0.954 وR^2=0.944 بودند. این تحقیق قابلیت بکارگیری این تکنیک و داده های مستخرج از پاسخ ارتعاشی را برای پیش بینی و مدلسازی سفتی میوه و پتانسیل بکارگیری آن را به عنوان یک وسیله جامع حسی غیر تماسی برای ارزیابی غیر مخرب میوه گلابی را نشان داد.

کلید واژه ها: اندازه گیری غیر مخرب، تکنیک ارتعاشی، سفتی، گلابی، لیزر داپلر ویبرومتر

مقدمه

گلابی‌ها پس از برداشت به رسیدن ادامه می‌دهند تا به مرحله‌ای می‌رسند که برای مصرف مناسب و پس از آن غیر قابل استفاده می شوند [Murayama et al., 1998]. بنابراین دستیابی به رسیدگی میوه در زمان انبارداری پس از برداشت خیلی مهم است. سفتی یک عامل مهم و کلیدی در تعیین کیفیت محصول قابل قبول برای مصرف کننده است و مرتبط با میزان رسیدگی محصول و شرایط نگهداری آن است . [Molina-Delgado et al., 2009] هنگامی‌که میوه‌ها می‌رسند خصوصیات زیادی از آنها مانند نرمی گوشت، رنگ پوست، بو، اسیدیته و شیرینی تغییر می‌کند و هریک از آنها می تواند به عنوان یک عامل رسیدگی بکار رود. سفتی میوه به طور سنتی نشانه‌ای از رسیدگی میوه است که با تغییر ویژگی های ویسکوالاستیک همراه است . ویژگی های ویسکوالاستیک میوه به‌وسیله روشهای غیر مخرب ارتعاشی تعیین می شود [Terasaki et al., 2001b] که در افزایش کنترل کیفی و بازارپسندی محصول دارای اهمیت است.

تحقیقات زیادی برای تعیین سفتی میوه ها انجام شده است که در آنها به طور سنتی از روش مگنس تیلور(M-T) یا فروسنج‌های دستی برای تعیین سفتی میوه ها استفاده شده است. آزمایش مگنس تیلور بیشینه نیرویی را که برای نفوذ به بافت میوه با بکارگیری یک استوانه فشاری نیاز است اندازه گیری می کند . مقاومت به

نفوذ در بافت میوه بستگی به ضخامت دیواره سلولی و مقاومت پیوندهای بین سلولی دارد [Landahl et al., 2004].

ارتعاش بر پایه تکنیک‌های اندازه‌گیری غیر مخرب بطرز گسترده‌ای برای اندازه‌گیری سفتی میوه‌ها بکار برده شده است. این تکنیک‌ها بر پایه ضربه آرام میوه با یک چکش کوچک هستند و ارتعاش مکانیکی منتجه به طور مستقیم با شتاب سنج ها اندازه گیری می شوند [Langenakens et al., 1997]. این روشها دارای این محدودیت هستند که برای تعیین ارتعاش باید شتاب سنج به سطح میوه چسبانده شود.

تغییرات وابسته به رسیدگی در بافت میوه های کیوی، هلو و گلابی ژاپنی و نیز برخی اختلالات فیزیولوژیکی بافت یک از نوع مرکبات در مراحل مختلف رسیدگی مورد بررسی قرارگرفت و سپس اختلاف فاز بین سیگنالهای ورودی و خروجی با داده های مخرب بافت سنجی مقایسه شد[Muramatsu et al., 1999]. همین - طور با استفاده از روش مذکور، آزمایش‌هایی را برای تعیین تغییرات بافت میوه‌های خرمالو، سیب و کیوی در مدت زمان رسیدگی، انجام دادند. در دامنه مشخصی از فرکانس‌ها، اختلاف فاز به عنوان تابعی از رسیدگی به طور معنی داری تغییر می کرد. ارتفاع قله در مورد سیبها به عنوان تابعی از مدت زمان انبارداری بدست آمد، در صورتی که برای سایر میوه‌ها الگوی ثابتی مشاهده نشد [Muramatsu et al., 2000].

همچنین تغییرات در پلی ساکاریدهای دیواره سلولی کیوی و خواص ویسکو الاستیک آن با کمک لیزر داپلر ویبرومتر اندازه گیری شد . در این آزمایش الا ستیسیته گوشت میوه به صورت نمایی کاهش یافت و ویسکوسیته ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا کرد [Terasaki et al., 2001a] . اندازه‌گیری سفتی ارقام سیب و گلابی با استفاده از لیزر داپلر ویبرومتر مورد بررسی قرار گرفته و شاخص الاستیک آنها با توجه به فرکانس تشدید دوم و جرم میوه محاسبه شده است [Terasaki et al., and Murayama et al., 2006] . روش ارتعاشی غیر مخرب با LDV برای دستیابی به ارزیابی غیر مخرب کیفیت ارقامی از خرمالو، گلابی و هندوانه در ضمن دوره پس از برداشت انجام شده که شاخص الاستیسیته از فرمول $EI=f_2^2m^{2/3}$ تعیین و در نهایت روند تغییر EI در طول دوره مشخص شد [Taniwaki et al., 2009a, b].

شاخص‌های کیفی میوه می توانند با سیگنال پاسخ ارتعاشی همبستگی برقرار کنند. مطالعات اندکی برای ایجاد یک مدل با استفاده از سیگنال لیزر داپلر ویبرومتر برای پیش‌بینی سفتی انجام شده است . بیشتر محققان قبلی شاخص الاستیسیته (EI) یا تغییر فاز در فرکانس های از قبل تعیین شده را بکار برده بودند. آن‌ها محدود به ارزیابی میوه‌های سیب، گلابی، کیوی، خرمالو و خربزه می شوند. تاکنون پژوهشی در زمینه همبستگی طیف پاسخ ارتعاشی با شاخص کیفی همچون سفتی میوه گلابی رقم درگزی در زمان رسیدگی در سردخانه انجام نشده است.

در این پژوهش تکنولوژی لیزر داپلر برای اندازه گیری طیف پاسخ فرکانسی گلابی در زمان انبارداری بکار رفته و روش رگرسیونی چند مرحله‌ای[1] (MLR) برای ایجاد مدل‌های پیش بین سفتی میوه بکار رفتند . این اطلاعات برای طراحی و توسعه دسته‌بندی غیر مخرب با بکارگیری تکنولوژی لیزر داپلر ویبرومتر[2] (LDV) و مقایسه آن با دیگر روش‌های غیر مخرب مفید هستند.

[1] Multiple Linear Regression
[2] Laser Doppler vibrometer

مواد و روشها

نمونه‌های گلابی رقم درگزی (رقم صادراتی) برای آزمایش‌ها انتخاب شدند . در کل 120 عدد گلابی استفاده شد که در طول آزمایش ها، آن‌ها به مدت 4ماه در دمای 1°C و با رطوبت نسبی 85٪ در سردخانه نگهداری شدند. به فاصله هر 21 روز، تعداد 20 عدد از نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفتند.

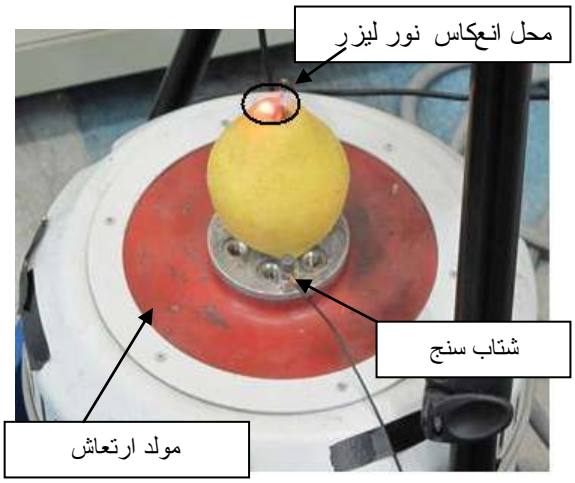
آزمایش‌ها بر روی میوه‌ها به‌صورت تکی انجام می‌شد. در شکل 1 موقعیت میوه گلابی بر روی مولد ارتعاش نشان داده شده است. هر میوه بر روی مولد ارتعاش قرار می گرفت و در گستره فرکانسی از 0-3200Hz به مدت 10 ثانیه توسط سیگنال‌های سینوسی تحریک می‌شد. سیگنال‌ها توسط یک آمپلی‌فایر (BAA120, TIRA, Germany) تولید می‌شد و دامنه آن طوری تنظیم شد که از افتادن نمونه ها از سطح ارت عاشی جلوگیری کند . پاسخ ارتعاشی هر نمونه توسط لیزر داپلر ویبرومتر (VH-1000-D, Ometron, Denmark) به وسیله سیستم پالس (Dynax module, B&K, Denmark) قرائت می‌شد. ارتعاش بکار رفته برای هر میوه توسط لرزاننده الکترودینامیکی با بکارگیری یک شتاب‌سنج (Model Endevco 4397, Meggitt's Endevco Co, USA) که در نزدیکی میوه روی سطح مولد ارتعاش قرار می گیرد اندازه‌گیری می‌شد. طیف پاسخ ارتعاشی هر نمونه با الگوریتم تبدیل فوریه سریع در گستره 0-3200 Hz و با دقت 2Hz بدست می‌آمد. سپس مقادیر تغییر فاز (φ) و دامنه (Amp) با استفاده از مقادیر واقعی (a_n) و موهومی (b_n) سیگنال پاسخ پس از تبدیل فوریه در هر گستره فرکانسی حاصل شد. رابطه آن‌ها به‌صورت زیر است:

$$X(n) = a_n + ib_n \quad (1)$$

$$\varphi(n) = \tan^{-1}\frac{b_n}{a_n} \quad (2)$$

$$Amp(n) = \sqrt{{a_n}^2 + {b_n}^2} \quad (3)$$

بعد از اندازه‌گیری پاسخ ارتعاشی با لیزر داپلر ویبرومتر، اندازه‌گیری سفتی مگنس- تیلور انجام شد . این سفتی برابر با بیشینه نیروی وارده به میوه توسط یک پروب 8mm با ماشین آزمون مواد بود. این نیرو در سه ناحیه از دایره استوایی میوه بدست می‌آمد و بیشینه نیرو از نمودار نیرو- جابجایی بدست می آمد [De Belie et al., 2000]. از نرم‌افزارهای SPSS و Unscrambler نسخه‌های 16 و 10.2 به‌ترتیب برای آنالیز داده‌ها استفاده شد.



شکل 1- محل قرارگیری گلابی بر روی مولد ارتعاش و محل انعکاس نور لیزر

میانگین نیروی سفتی بر اساس اندازه‌گیری در سه ناحیه از دایره استوایی نمونه‌ها بدست آم دند. طیف - های فاز و دامنه بین سیگنال‌های ورودی و خروجی در یک گستره وسیع فرکانسی استخراج شدند. رگرسیون خطی چند مرحله‌ای (MLR) برای توسعه مدل‌های پیش‌بین با بکارگیری طیف‌های بدست آمده بکار رفت . این روش فرکانس‌هایی را انتخاب می کند که مقادیر تغییر فاز و دامنه آن ها بالاترین همبستگی را با متغیرهای روابط رگرسیون خطی دارند. برای تعیین فرکانس ها از فرآیند گام به گام بهره گرفته می‌شد. رابطه ای که رفتار پارامتر وابسته به توصیف‌گرها را نشان می‌دهد به صورت زیر است:

$$Y_i=\beta_0+\beta_i\times X_i \qquad (i=1, 2, 3,\ldots., n) \quad (4)$$

در رابطه (4)، Y_iها متغیرهای وابسته، β_0 عرض از مبدا، β_i ها ضرایب رگرسیونی و n تعداد متغیرهای مستقل هستند [Zhang et al., 2008]. به دلیل تعداد محدود نمونه‌ها، برای سنجش اعتبار مدل ها روش اعتبارسنجی متقاطع یگانه بکار رفت. برای ارزیابی عملکرد مدل های کالیبراسیون، ضریب تعیین (R^2) بین مقادیر اندازه گیری شده و پیش‌بینی شده و میانگین مربعات خطا (RMSE) برای داده‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی بدست آمدند . یک مدل خوب باید مقدار RMSE کم و ضریب تعیین بالا داشته و یک تفاضل کمی بین RMSE پیش بینی و ارزیابی داشته باشد.

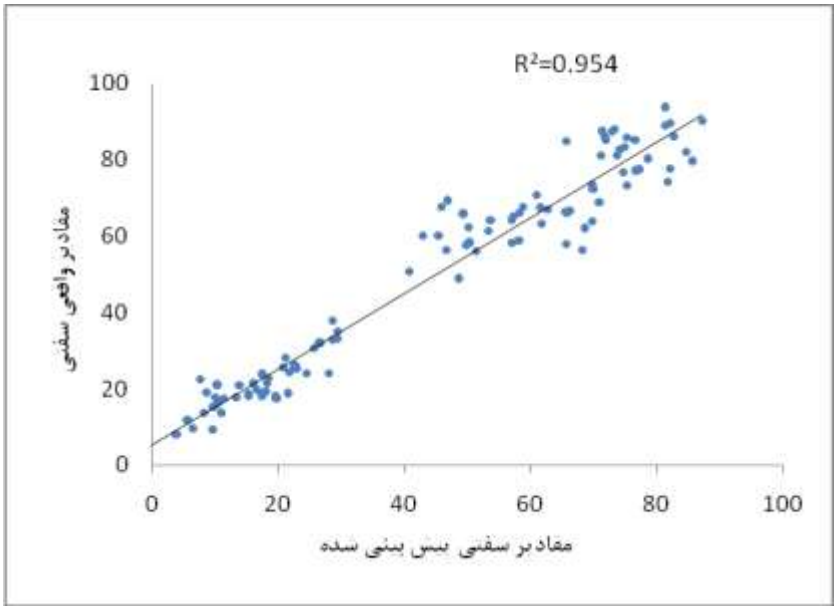
نتایج و بحث

ارتباط بین سیگنال LDV و شاخص سفتی میوه گلابی بوسیله الگوریتم MLR بیان می شود . در جدول 1، ظرفیت پیش‌بینی و دقت مدل‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی ارائه شده است . مدل های 1 و 2 به ترتیب با بکارگیری داده‌های طیف دامنه و فاز پاسخ ارتعاشی برای پیش بینی شاخص سفتی مگنس- تیلور ایجاد شده‌اند . در شکل2، مقادیر سفتی واقعی در مقابل مقادیر پیش بینی شده با استفاده از طیف دامنه پاسخ ارتعاشی (مدل1) ارائه شده است.

جدول1- نتایج مدل‌های MLR برای پیش‌بینی سفتی بر اساس سیگنال پاسخ ارتعاشی

مدل‌ها	کالیبراسیون		اعتبارسنجی	
	R_C^2	$RMSE_C$	R_{CV}^2	$RMSE_{CV}$
1	0.954	0.861	0.932	1.449
2	0.944	0.878	0.921	1.756

همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج حاکی از ارتباط قوی سیگنال پاسخ ارتعاشی با شاخص سفتی مگنس- تیلور گلابی می‌باشد. نتایج مدل‌های پیش‌بین MLR عالی می‌باشند و هر دو طیف فاز و دامنه به خوبی قادر به پیش‌بینی مشخصه سفتی می‌باشند. در این پژوهش، سیگنال پاسخ فرکانسی میوه گلابی به تحریک وارده به آن ، در گستره فرکانسی 0 تا 3200 هرتز ارزیابی شد. این نکته را می‌توان دریافت که ارتعاش اعمالی با بافت میوه به عنوان تابعی از شاخص سفتی میوه تغییر می کند. همچنین این امر آشکار می‌شود که ساختار داخلی میوه گلابی در زمان نگهداری موجب تغییرات پارامترهای مودال استخراج شده از پاسخ ارتعاشی می‌شود. بنابراین تغییرات فاز و



شکل2- مقادیر سفتی واقعی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده با بکارگیری طیف اندازه پاسخ ارتعاشی

دامنه سیگنال‌های ارتعاش اعمال شده و دریافت شده با این پدیده مطابقت دارد . پس ایجاد مدل های پیش بینی شاخص سفتی با این دو طیف امکان پذیر می شود. در این پژوهش، برای اولین بار روش MLR برای توسعه مدل های پیش‌بین شاخص سفتی میوه گلابی با بکارگیری تابع پاسخ فرکانسی بکار رفت. در پژوهش های قبلی LDV [Muramatsu et al. 1999] از تغییر فازهای خاصی آن هم در فرکانس‌های از پیش تعیین شده با فواصل 400 هرتزی بهره گرفت، در حالی که اینجا از کل سیگنال استفاده شده و بهترین فرکانس ها برای استفاده در مدل MLR انتخاب شدند. از مقادیر دامنه در قله‌های تشدید در مورد سیب به عنوان تابعی از زمان نگهداری استفاده شده بود [Muramatsu et al., 2000] ولی در این پژوهش از مقادیر کل طیف دامنه استفاده شده است . ضرایب تعیین بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده نشان از عملکرد عالی مدل‌ها و قابلیت پیش بینی آن ها دارد . مقایسه نتایج جدول 1 نشان می‌دهد که هر دو طیف می توانند شاخص سفتی مگنس- تیلور را به‌خوبی پیش بینی کنند، هر چند که طیف اندازه کمی بهتر این امر را انجام می‌دهد. این یافته‌ها با نتایج [Zhang et al., 2008] که از روش MLR برای پیش‌بینی مشخصه‌های کیفی گلابی استفاده کرد، مطابقت دارد.

بنابراین، مقادیر تغییر فاز و دامنه مستخرج از تابع پاسخ فرکانسی این پتانسیل را دارند که برای پیش بینی مشخصه کیفی(سفتی) میوه گلابی بکار روند و در توسعه سامانه های دسته‌بندی بکار روند. نتایج این پژوهش نشان می دهد که تابع پاسخ فرکانسی LDV می‌تواند یک جایگزین با ارزش با روش های وقت‌گیر و مخرب معمول باشد و برای تعیین مهمترین مشخصه کیفی میوه گلابی بکار رود. پس با بررسی نتایج این امر آشکار می‌شود که این روش غیر مخرب می‌تواند برای اندازه‌گیری سفتی گلابی درگزی بکار رود . روش رگرسیون چند مرحله ای(MLR) نیز پتانسیل تخمین مشخصه سفتی میوه گلابی از سیگنال لیزر داپلر ویبرومتر را دارد.

منابع

-De Belie, N., Schotte, S., Lammertyn, J., Nicolai, B., De Baerdemaeker, J. (2000). Firmness changes of pear fruit before and after harvest with acoustic impulse response technique. Journal of agricultural Engineering Research, 77(2), 183-191.
-Landahl. S., Jacksok, P. T., De Baerdemaeker, J. (2003). Firmness of developing apples on the tree and shortly after harvest measured with the acoustic impulse response. Acta Horticulturae, 600, 63–70.
-Langenakens, J.,Vandewalle, X., De Baerdemaeker, J., 1997. Influence of global shape and internal structure of tomatoes on the resonant frequency. J. Agric. Eng. Res. 66, 41–49.
-Molina-Delgado, D., Alegre, S., Barreiro, P., Valero, C., Ruiz-Altisent, M., Recasens, I. (2009). Addressing potential sources of variation in several non-destructive techniques for measuring firmness in apples. . Biosystems Engineeing, 104(1), 33-46.
-Muramatsu, N., Sakurai, N., Wada, N., Yamamoto, R., Takahara, T., Ogata T., Tanaka, K., Asakura, T., Ishikawa-Takano, Y., Nevins, D.J. (1999). Evaluation of fruit tissue texture and internal disorders by laser Doppler detection, Postharvest Biology and Technology, 15(1), 83-88.
-Muramatsu, N., Sakurai, N., Wada, N., Yamamoto, R., Tanaka, K., Asakura, T., Ishikawa-Takano, Y., Nevins, D.J. (2000). Remote sensing of fruit textural changes with a laser Doppler vibrometer. Journal of the American Society for Horticultural Science, 125(1), 120-127.
-Murayama, H., Konno, I., Terasaki, S., Yamamoto, R., Sakurai, N. (2006). Nondestructive method for measuring fruit ripening of ‘La France’ pears using a laser Doppler vibrometer. Journal of Japanese Society for Horticultural Science, 75, 79–84.
-Taniwaki, M., Hanada, T., Sakurai, N. (2009a). Postharvest quality evaluation of‘‘Fuyu” and ‘‘Taishuu” persimmons using a nondestructive vibrational method and an acoustic vibration technique. Postharvest Biology and Technology, 51(1), 80-85.
-Taniwaki, M., Hanada, T., Tohro, M., Sakurai, N. (2009b). Non-destructive determination of the optimum eating ripeness of pears and their texture measurements using acoustical vibration techniques. Postharvest Biology and Technology, 51(3), 305-310.
-Terasaki, S., Sakurai, N., Yamamoto, R., Wada, N., & Nevins, D. J. (2001a). Changes in cell wall polysaccharides of kiwifruit and the visco-elastic properties detected by a laser Doppler method. Journal of Japanese Society for Horticultural Science. 70, 572–580.
-Terasaki, S., Sakurai, N., Zebrowski, J., Murayama, H., Yamamoto, R., & Nevins, D. J. (2006). Laser Doppler vibrometer analysis of changes in elastic properties of ripening ‘La France’ pears after postharvest storage. Postharvest Biology and Technology, 42, 198–207.
-Terasaki, S., Wada, N., Sakurai, N., Muramatsu, N., Yamamoto, R., & Nevins, D. J. (2001b). Nondestructive measurement of kiwifruit ripeness using a laser Doppler vibrometer. Transactions of the ASAE, 44, 81–87.
-Zhang, H., Wang, J., Ye, S. (2008). Predictions of acidity, soluble solids and firmness of pear using electronic nose technique. Journal of Food Engineering. 86, 370-378.