

استفاده از پاسخ ارتعاشی هندوانه به منظور تعیین سفتی بافت داخلی آن

روزبه عباس زاده¹، علی رجبی پور²، مجتبی دلشاد³، محمد محبوب⁴، حجت احمدی⁵

- 1- دانش آموخته دکتری گروه مهندسی ماشین های کشاورزی دانشگاه تهران- سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران
- 2- استاد گروه مهندسی ماشین های کشاورزی دانشگاه تهران
- 3- استادیار گروه علوم باغبانی دانشگاه تهران
- 4- دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تهران
- 5- دانشیار گروه مهندسی ماشین های کشاورزی دانشگاه تهران

آدرس پست الکترونیکی مکاتبه کننده (Abaszadeh@ut.ac.ir)

چکیده

سفتی بافت داخلی هندوانه ویژگی مهمی است که می تواند به عنوان یک شاخص رسیدگی در درجه بندی هندوانه ها مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق یک روش غیرمخرب اپتیکی- ارتعاشی برای تعیین سفتی هندوانه رقم کریمسون سوییت بکار رفت. نمونه ها با استفاده از یک دستگاه مولد ارتعاش در گستره ای از فرکانس ها تحریک و پاسخ آن به شکل غیرتماسی و با استفاده از فناوری ارتعاش سنجی لیزر داپلر (LDV) اندازه گیری می شد. با در نظرگیری سیگنال های تحریک و پاسخ و استفاده از تبدیل فوریه سریع، تابع پاسخ فرکانسی (FRF) هر نمونه که متشکل از دو طیف اندازه و فاز بود، بدست آمد. پس از آزمون های مودال که در سال 89 و شرکت ایتراک، سفتی بافت هندوانه ها به وسیله نفوذسنج و در سه نقطه متفاوت اندازه گیری شد. سپس به منظور استخراج مدل های پیش بینی سفتی از طیف های پاسخ ارتعاشی پارامترهای مودال، روش همبستگی، رگرسیون گام به گام (SMLR) و روش حداقل مربعات نسبی (PLS) مورد استفاده قرار گرفتند. در نهایت استفاده از تکنیک رگرسیون گام به گام و طیف فاز پاسخ ارتعاشی به عنوان بهترین گزینه برای آشکارسازی سفتی هندوانه انتخاب شد. مقادیر R^2 و RMSE اعتبارسنجی مدل های پیش بینی سفتی به ترتیب 0/9993 و 0/012kgf بدست آمدند. یافته های این تحقیق، قابلیت روش مذکور را در پیش بینی غیرمخرب سفتی هندوانه به منظور استفاده در صنعت درجه بندی نشان دادند.

کلمات کلیدی: پاسخ ارتعاشی، سفتی، مدل پیش بینی، هندوانه، LDV.

مقدمه

می توان گفت تعیین رسیدگی هندوانه به خاطر ساختار منحصر به فرد و پوست ضخیمش امری دشوار برای مصرف کنندگان می باشد. رایج ترین روشی که به طور سنتی توسط مردم برای تعیین رسیدگی هندوانه بکار گرفته می شود، زدن ضربه به آن و قضاوت با استفاده از صدای ایجاد شده است که علاوه بر خطای عوامل انسانی، این کار ممکن است فقط روشی مناسب برای افرادی که تجربه زیادی دارند، باشد [Stone et al., 1996]. این موضوع باعث شده است محققین استفاده از روش آکوستیک را برای تعیین رسیدگی هندوانه مورد بررسی قرار دهند. علاوه بر اینکه اکثر محققین نتایج اطمینان بخشی را در بررسی های خود گزارش نکرده اند، این روش دارای محدودیت های فراوانی برای استفاده در درجه بندی هندوانه ها می باشد. به عنوان نمونه محل ضربه، فاصله میکروفون، زاویه برخورد

و جنس ابزار ضربه و ... می توانند در نتایج آزمون تأثیرگذار باشند. در این پژوهش استفاده از یک تکنیک اپتیکی - ارتعاشی غیر مخرب جدید برای آزمون کیفیت هندوانه مورد بررسی قرار می گیرد. در این روش سیگنال های ارتعاشی هندوانه در پاسخ به تحریک درگستره ای از فرکانس ها، با استفاده از فناوری¹ LDV بدون تماس مستقیم، دقیق و بهنگام آشکار می شود. موراماتسو و همکاران مقایسه ای بین استفاده از شتاب سنج و LDV برای اندازه گیری سفتی ارقامی از سیب، گلابی، کیوی و مرکبات انجام دادند. آنها نتایج اندازه گیری های انجام شده با LDV را دقیق تر از نتایج شتاب سنج بیان نمودند و این روش را دارای توانایی بالقوه برای ارزیابی به هنگام کیفیت و درجه بندی میوه ها دانستند [Muramatsu et al., 1997]. در ضمن موراماتسو و همکاران ارزیابی بافت و رسیدگی ارقامی از کیوی، هلو و گلابی را مدنظر قرار دادند. آنها نمونه ها را، در مراحل مختلف رسیدگی، توسط موج سینوسی از فرکانس 5 تا 2000 هرتز تحریک می کردند و ارتعاش در سطح بالایی میوه را به وسیله LDV اندازه گیری می نمودند. سپس تغییر فاز بین سیگنال ورودی و خروجی را با داده های بدست آمده از روش نیرو- جابجایی مقایسه کردند. ضریب همبستگی بین این دو روش در فرکانس های 1200 یا 1600 هرتز بین 0/81 تا 0/92 بدست آمد [Muramatsu et al., 1999]. تراساکی و همکاران از LDV برای ارزیابی خواص ویسکوالاستیک کیوی در مراحل مختلف رسیدگی، استفاده کردند. آنها دو ضریب $S = f_{n=2}^2 m^{2/3}$ و $\eta = (f_2 - f_1) / f_{n=2}$ را در نظر گرفتند که در آنها $f_{n=2}$ فرکانس دومین قله تشدید، m جرم میوه و f_1 و f_2 در 3 دسی بل پایین تر از قله تشدید تعیین می شوند. همچنین سفتی میوه به وسیله اندازه گیری نیروی مورد نیاز برای نفوذ 5 میلی متری یک مخروط در برش های میوه تعیین شد. مقدار R^2 برای رابطه بین S و سفتی کیوی برابر 0/967 بدست آمد. η نیز تطابق خوبی با مح توای مواد جامد قابل حل نشان داد [Terasaki et al., 2001]. بنگتسون و همکاران نیز قابلیت اندازه گیری پاسخ ارتعاشی آلو با ارتعاش سنج لیزری را تحت بررسی قرار دادند. داده های بدست آمده از طیف ارتعاشی که اختلاف فاز در فرکانس ها انتخاب شده (فرکانس های مجزا و گستره هایی از فرکانس ها)، بودند به وسیله رگرسیون چند متغیره به پارامترهای فیزیکی آلو شامل وزن، طول و عرض و همچنین زمان انبارداری مرتبط شدند. ضریب همبستگی برای موارد مذکور به ترتیب برابر 0/99، 0/97، 0/96 و 0/92 بود [Bengtsson et al., 2003]. متمورا و همکاران اندازه گیری سفتی شش رقم سیب را با استفاده از LDV مورد بررسی قرار دادند و شاخص الاستیک را از فرکانس تشدید دوم محاسبه نمودند. آنها علاوه بر روش مذکور سفتی نمونه ها را با استفاده از آزمون مگنس - تیلور اندازه گرفتند. ضرایب همبستگی بین نتایج دو روش برای 4 رقم از سیب ها بیش از 0/89 بدست آمد در حالی که برای دو رقم دیگر کمتر از 0/73 و 0/66 بود [Motomura et al., 2004]. ساکورای و همکاران آزمایش هایی را برای ارزیابی بافت خرمالو انجام دادند. آنها دریافتند داده های بدست آمده بوسیله LDV تطابق معنی داری را با سه متغیر نرمی، سختی و تردی برای خرمالوهایی که در رطوبت 60 و 100٪ انبار شده اند، نشان می دهند. این سه متغیر به وسیله حواس انسان ارزیابی شده بودند [Sakurai et al., 2005]. تراساکی و همکاران تکنیک LDV را به منظور مطالعه رسیدگی گلابی ها بکار بردند. آنها از دومین قله تشدید برای محاسبه شاخص الاستیسیته استفاده نمودند. ضریب همبستگی بین مقادیر اندازه گیری شده و مقادیر پیش بینی شده با مدل مساوی 0/997 شد [Terasaki et al., 2006]. مورایاما و همکاران تحقیقاتی را به وسیله LDV در مورد رسیدگی گلابی هایی که در زمان های مختلف برداشت و در دوره های متفاوت انبار می شدند، انجام دادند. نتایج نشان داد ضرایب همبستگی بین سفتی و شاخص الاستیسیته بطور معنی داری بالا و وابسته به تاریخ برداشت یا مدت زمان انبارداری بودند به

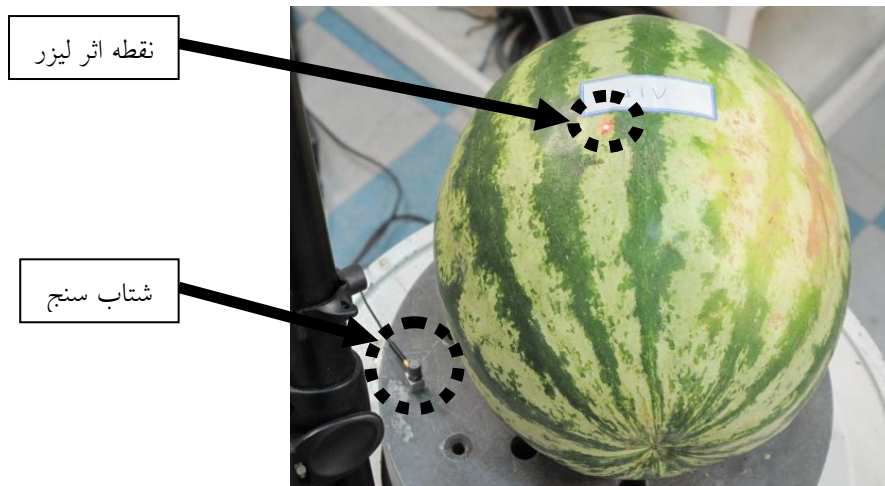
¹ Laser Doppler Vibrometry

جز برای گلابی هایی که به مدت 4 ماه در دمای 1°C انبار شده بودند [Murayama et al., 2006]. تانیواکی و همکاران تحقیقات جداگانه ای را به منظور بررسی روند تغییرات شاخص الاستیسیته ارقامی از خربزه، خرمالو و گلابی در ضمن دوره پس از برداشت انجام دادند. آنها شاخص الاستیسیته را از فرمول $EI=f_2^2 m^{2/3}$ تعیین نمودند. f_2 که دومین فرکانس تشدید نمونه بود با استفاده از LDV بدست آمد. نمونه ها با استفاده از حواس افراد متخصص مورد ارزیابی قرار می گرفتند. این کار در یک دوره زمانی و در فواصل مشخص انجام می شد و رسیدگی میوه ها با در نظر گرفتن ویژگی هایی همچون ظاهر، شیرینی، سختی و ... (هر یک بطور جداگانه) ارزیابی می شدند. همچنین رسیدگی میوه از لحاظ کلی نیز مورد ارزیابی قرار می گرفت. همبستگی بالایی بین EI و ویژگی های مذکور مشاهده شد [Taniwaki et al., 2009].

شیان توجه است که در تحقیقات انجام شده با LDV به منظور آزمون غیرمخرب محصولات کشاورزی، پژوهشی در مورد هندوانه ارائه نشده است و ساختار میوه هایی که مورد آزمون قرار گرفته اند نیز متمایز از هندوانه می باشد. همچنین در این تحقیقات عمدتاً، فقط شاخص الاستیسیته $(EI=f_2^2 m^{2/3})$ از نتایج آزمون ها استخراج و از آن برای پیش بینی کیفیت میوه استفاده شده است. علاوه بر آن، فرکانس تشدید، نسبت میرایی و فاز در فرکانس های از پیش تعیین شده نیز به کار رفته اند، در حالی که بررسی تمامی نقاط طیف پاسخ ارتعاشی می تواند دستاوردهای بیشتری را در استخراج اطلاعات از نتایج تکنیک LDV بالفعل نماید. هدف از انجام این پژوهش، توسعه روشی غیر مخرب بر مبنای پاسخ ارتعاشی و با استفاده از LDV به منظور تعیین رسیدگی هندوانه و ارائه مدل های ریاضی به منظور انعکاس ارتباط پارامترهای ارتعاشی هندوانه با شاخص های کیفی آن می باشد.

مواد و روشها

در این تحقیق 43 هندوانه از رقم کریمسون سوئیت که یکی از ارقام صادراتی کشور است، برای انجام آزمایش ها انتخاب شدند. این هندوانه ها از ایستگاه تحقیقات باغبانی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران و مزرعه - ای در حوالی آبیگ قزوین برداشت شدند. همچنین تعداد معدودی هندوانه نیز از بازار میوه و تره بار تهیه شدند. از برخی نشانه های ظاهری برای تشخیص محتمل ویژگی های مورد نظر استفاده و نمونه هایی با درجات مختلفی از رسیدگی برداشت شد. اندازه گیری پاسخ ارتعاشی هندوانه ها در شرکت ایتراک (شرکت آزمایش و تحقیقات قطعات و مجموعه های خودرو) انجام شد. ابتدا نمونه روی قسمت متحرک لرزاننده الکترو دینامیک قرار داده می شد. تحریکی که توسط لرزاننده اعمال شد ارتعاشات نوین (نوفه) سفید یا سیگنال تصادفی بود. نوین سفید اعمال شده در محدوده باند فرکانسی صفر تا 1000 هرتز، نمونه را تحریک می کرد. از یک آمپلی فایر برای تقویت سیگنال های تحریک و همچنین تنظیم دامنه یا حداکثر میزان جابجایی صفحه بالای لرزاننده استفاده شد. برای تعیین تابع پاسخ فرکانسی، تحریک ورودی و پاسخ خروجی باید به طور همزمان اندازه گرفته شوند. ارتعاش اعمال شده به میوه توسط لرزاننده توسط شتاب سنجی که در محل قرار گیری میوه نصب شده بود اندازه گیری و در نهایت به رایانه منتقل می شد (شکل 1). پاسخ هندوانه نسبت به ارتعاش ورودی توسط فناوری LDV بدست آمد. برای آشکارسازی این ارتعاش خروجی از ارتعاش سنج لیزری داپلر استفاده شد. براساس اصل فیزیکی داپلر تغییر مکان م منبع تولید امواج نسبت به یک ناظر موجب تغییر فرکانس یا طول امواج دریافت شده توسط ناظر می شود. با استفاده از LDV لیزر به سطح بالایی هندوانه تابانده و بازتابش آن دریافت می شد. با در نظرگیری امواج تابیده شده و بازتابیده شده و تغییر فرکانس ایجاد شده می توان سرعت و ارتعاش سطح متحرک را اندازه گرفت (شکل 2).



شکل 1. نحوه قرارگیری نمونه بر روی لرزاننده و اندازه گیری تحریک و پاسخ هندوانه به آن



شکل 2. نحوه قرارگیری ارتعاش سنج لیزری

ثبت داده های آزمایش ها تحت مدیریت یک سامانه ویژه جمع آوری داده ها انجام شد. از جمله وظایف دیگر این سامانه تحلیل FFT و همچنین تعیین مؤلفه های تابع پاسخ فرکانسی بود. خروجی هر یک از آزمون ها شامل مؤلفه های حقیقی و موهومی اعداد مختلط مربوط به تابع پاسخ فرکانسی (FRF) نمونه ها در گستره فرکانس صفر تا 1000 هرتز بود. با استفاده از این مؤلفه ها طیف پاسخ فرکانسی بر حسب اندازه و بر حسب اختلاف فاز بدست آمد. به منظور اندازه گیری سفتی بافت هندوانه که نشان دهنده درجه تردی یا نرمی آن است و می تواند به عنوان یک شاخص رسیدگی به کار رود، از یک دستگاه نفوذسنج استفاده شد. روش به کار رفته بدین صورت بود که نیروی مورد نیاز برای نفوذ پیستونی کوچک با قطر 8 میلی متر به داخل بافت درونی هندوانه به وسیله نیروسنج و بر حسب کیلوگرم-نیرو اندازه گیری شد. یک $kg.f$ معادل $9/8$ نیوتن است. اندازه گیری سفتی در 3 نقطه از مقطع برش خورده هر نمونه انجام شد و سعی شد این سه نقطه در سه مکان متفاوت یعنی وسط، نزدیک پوست و میان

این دو انتخاب شوند. سفتی هر نمونه بر مبنای میانگین داده های بدست آمده گزارش شد. با استفاده از مقدار فاز در فرکانس هایی که فاز در آنها بالاترین همبستگی را با سفتی دارد و س ایر پارامترهای مستخرج از پاسخ ارتعاشی نظیر فرکانس تشدید، نسبت میرایی و اندازه و همچنین وزن، مدل های رگرسیون خطی چندگانه (MLR) به عنوان مدل های پیش بینی کننده سفتی هندوانه کالیبره شدند. تکنیک رگرسیون خطی چندگانه گام به گام (RLMS) نیز بر روی طیف های مربوط به فاز پاسخ ارتعاشی و همچنین طیف های اندازه پاسخ ارتعاشی اعمال شد. هر طیف شامل ماتریسی با 1600 ستون و 43 سطر بود. بر اساس این تکنیک در هر گام، هر متغیر مستقل با توجه به معیاری که در نظر گرفته شده بود (در این تحقیق احتمال آماره F) به معادله وارد یا از آن خارج می شود و زمانی که هیچ متغیر واجد شرایطی برای گنجاندن در مدل یا حذف از آن موجود نباشد این فرایند خاتمه می یابد. در نهایت به وسیله بهترین متغیرهای پیش بین منتخب مدلی خطی ساخته شد. همچنین در این پژوهش، توانایی رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS) در ارائه مدل های پیش بینی ویژگی های کیفی هندوانه مورد ارزیابی قرار گرفت. در این روش تعدادی متغیر پنهان که دارای بیشترین قابلیت در توجیه تغییرات متغیرهای وابسته و مستقل هستند استخراج می شوند و با استفاده از ترکیب خطی آنها، عمل مدلسازی به طور غیرمستقیم انجام می شود. پس از کالیبراسیون مدل ها، معتبرسازی متقاطع ترک یگانه برای سنجش اعتبار مدل ها به کار رفت و ضریب تعیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز اندازه گیری شدند. در این روش اعتبارسنجی ابتدا یکی از نمونه ها کنار گذاشته می شود و سایر نمونه ها در ساخت مدل (کالیبراسیون) به کار می روند. سپس مدل ایجاد شده برای پیش بینی نمونه ای که در تشکیل آن شرکت نداشته است، مورد استفاده قرار می گیرد. این کار تا انجام این فرایند برای تمامی نمونه ها ادامه می یابد.

نتایج و بحث

در جدول 1 مقدار ضریب تعیین و ریشه میانگین مربعات خطا مربوط به کالیبراسیون و اعتبارسنجی متقاطع مدل های ایجاد شده براساس همبستگی و پارامترهای مودال تابع پاسخ فرکانسی هندوانه آورده شده است. جدول 1. مدل های ایجاد شده براساس طیف همبستگی و پارامترهای مودال تابع پاسخ فرکانسی

کالیبراسیون		اعتبارسنجی		
R2	RMSE	R2	RMSE	
0/8526	0/1654	0/6817	0/2562	طیف همبستگی و پارامترهای مودال

عملکرد مدل های SMLR در پیش بینی سفتی بافت هندوانه بر حسب R^2 و RMSE در جدول 2 نشان داده شده است.

جدول 2. مدل های ایجاد شده با رگرسیون گام به گام برای پیش بینی سفتی هندوانه

کالیبراسیون		اعتبارسنجی		
R2	RMSE	R2	RMSE	
0/5866	0/2902	0/509	0/3175	طیف اندازه
0/9999	0/0045	0/9993	0/0116	طیف فاز

جدول 3 R^2 و RMSE را برای بهترین مدل های بدست آمده با روش PLS ارائه می دهد.

جدول 3. مدل های ایجاد شده با رگرسیون حداقل مربعات جزئی به منظور پیش بینی سفتی هندوانه

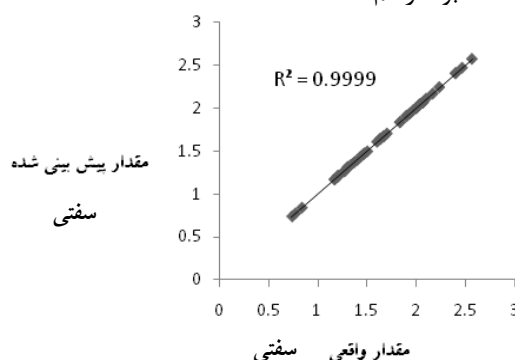
اعتبارسنجی		کالیبراسیون		
RMSE	R2	RMSE	R2	
0/4115	0/202	0/3424	0/4247	طیف اندازه
0/4768	0/0603	0/1034	0/9475	طیف فاز

ارزیابی مدل هایی که متغیرهای آنان به وسیله تکنیک SMLR از طیف های LDV استخراج شده بودند نشان داد که به طور کلی این تکنیک عملکرد بهتری در مقایسه با مدل های ایجاد شده با PLS، دارند در ضمن مقایسه میان مدل های بدست آمده از طیف های اندازه و فاز، کارایی به مراتب بالاتر مدل های مستخرج از طیف فاز را در پیش بینی سفتی هندوانه نشان داد. مدل برگزیده که با اعمال SMLR بر طیف فاز بدست آمد دارای 25 متغیر منتخب است که متغیرها (فرکانس هایی که اختلاف فاز در آنها محاسبه می شود) و ضرایب آنها در مدل، در جدول 4 آمده است. ترتیب قرارگیری فرکانس ها در جدول بر اساس ترتیب قرارگیری مدل های یک متغیره، دو متغیره، سه متغیره و ... در فرایند ساخت مدل ها، بود به طوری که مثلاً متغیر اول دارای بیشترین قابلیت در مدل پیش بینی سفتی است. ضمناً اولین ضریب، ضریب ثابت مدل می باشد.

جدول 4. فرکانس های منتخب و ضرایب آنها در مدل پیش بینی سفتی رقم کریمسون سویت

685/6	705/63	705	526/88	973/75	32/5	80	59/375	فرکانس
0/115	-0/143	0/135	-0/144	0/2078	0/254	0/668	1/067	0/052
58/13	490	946/25	443/75	954/38	191/25	896/9	246/88	714/4
-0/28	0/027	0/0468	0/0411	-0/069	0/064	-0/1	0/0959	0/136
	598/75	216/88	766/25	176/88	808/13	820/6	719/38	121/9
	0/005	-0/007	-0/007	0/0142	0/011	-0/02	0/0215	0/03

در شکل 3 نیز مقادیر سفتی هندوانه محاسبه شده توسط مدل پیش بینی، در برابر مقادیری که با روش مخرب و توسط نفودسنج اندازه گیری شده بود، رسم شده است.



شکل 3. مقادیر سفتی پیش بینی شده در برابر مقادیر اندازه گیری شده

می توان نتیجه گرفت که پس از تحریک هندوانه به وسیله سیگنال ارتعاشی و انتقال این سیگنال از طریق (یا به واسطه) هندوانه، تغییر فازی در ارتعاش اولیه که ناشی از عبور آن از میان میوه است ایجاد می شود. این پدیده که بر پایه تفاوت سیگنال ورودی و خروجی اندازه گیری می شود تحت تأثیر واسطه عبور سیگنال که همان میوه هندوانه است می باشد و در نتیجه تغییرات متابولیک دیواره سلول های هندوانه و محتویات آن در فرایند رسیدگی و به تبع آن تغییرات ویسکوالاستیک و سفتی بافت داخلی میوه موجب تفاوت در فاز سیگنال پاسخ که با روش اپتیکی LDV آشکار شده است می شود. لذا با کنکاش و داده کاوی در طیف فاز می توان اطلاعات ارزشمندی یافت

که ترکیب بهینه آنها قابلیت تعیین غیرمخرب رسیدگی هندوانه را دارا باشد و از آن همچون یک اثر انگشت از رسیدگی میوه استفاده کرد.

با بررسی سایر تحقیقات و با احتمال فراوان (به علت عدم دسترسی به همه منابع) می توان گفت اعمال روش رگرسیون خطی چندگانه گام به گام (SMLR) بر روی طیف های فاز تابع پاسخ فرکانسی میوه ها و استخراج مدل های پیش بینی کیفیت با استفاده از این تکنیک، برای اولین بار است که انجام می شود. موراماتسو همبستگی میان کیفیت کیوی، هلو و گلابی و اختلاف فاز در فرکانس های از پیش تعیین شده را با فواصل 400 هرتزی (مشابه فواصل 50 هرتزی در آزمون های ابتدایی این پژوهش) مورد اندازه گیری قرار داد حال آنکه با روش SMLR به کار رفته در این پژوهش می توان کل داده های طیف فاز را بررسی و نتایج بسیار بهتری بدست آورد. یکی از مهمترین مزیت های کاربرد LDV علاوه بر دقت و سرعت آن، دریافت پاسخ ارتعاشی بدون تماس می باشد که امکان استفاده عملی از آن را در درجه بندی هندوانه ها فراهم می آورد. بر پایه دستاورد های این تحقیق می توان الگوریتمی جامع برای سامانه آزمون، طبقه بندی و جداسازی هندوانه ها طراحی کرد.

منابع

1. Bengtsson G.B., Lundby, F. Haugen, J-E. Egelanddal, B. Marheim J.A. 2003. Prediction of postharvest maturity and size of Victoria plums by vibration response. Acta Hort. (ISHS) 599:367-372.
2. Motomura, Y., Nagao, T., Sakurai, N. 2004. Nondestructive and noncontact measurement of flesh firmness of 6 apple cultivars by Laser Doppler Vibrometer (LDV), Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi Volume 51, Issue 9, 2004, Pages 483-490.
3. Muramatsu, N., Sakurai, N., Wada, N., Yamamoto, R., Tanaka, K., Asakura, T., Ishikawa-Takano, Y., Nevins, D.J., (1997b) Critical comparison of an accelerometer and a laser Doppler vibrometer for measuring fruit firmness. HortTechnology 7,434-438.
4. Muramatsu N.1; 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, Volume 15, Number 1, January 1999 , pp. 83-88(6).
5. 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. J. Jpn. Soc. Hortic. Sci. 75, 79-84.
6. Sakurai, N., Iwatani, S., Terasaki, S., Yamamoto, R., 2005. Evaluation of 'Fuyu' persimmon texture by a new parameter, "Sharpness index". J. Jpn. Soc. Hortic. Sci. 74, 150-158.
7. Stone M L; Armstrong P R, Zhang X; Brusewitz G H; Chen D D (1996) Watermelon maturity determination in the field using acoustic impulse impedance techniques. Transactions of the ASAE, 39, 2325-2330.
8. Taniwaki, M., Hanada, T., Tohro, M. & Sakurai, N. (2009) Non-destructive determination of the optimum eating ripeness of pears and their texture measurements using acoustical vibration techniques. Postharvest Biol. Technol. 51,305-310.
9. Taniwaki, M., Takahashi, M. & Sakurai, N. (2009) Determination of optimum ripeness for edibility of postharvest melons using nondestructive vibration. Food Research International. 42, 137-141.
10. Taniwaki, M., Hanada, T., & Sakurai, N. (2009) Postharvest quality evaluation of 'Fuyu' and 'Taishuu' persimmons using a nondestructive vibrational method and an acoustic vibration technique. Postharvest Biology and Technology. Volume 51, Issue 1, January 2009, Pages 80-85.
11. Terasaki, S., Wada, N., Sakurai, N., Muramatsu, N., Yamamoto, R., & Nevins, D. J. (2001) Nondestructive measurement of kiwifruit ripeness using a laser Doppler vibrometer. Transactions of the ASAE, 44, 81-87.
12. 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.

