مقاله

کاربرد صوت در تعیین کیفیت درونی محصولات غذایی و کشاورزی

رسول کریمی
دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک بیوسیستم
پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
Rasul.karimi68@ut.ac.ir

محمد ابونجمی*
دانشیار گروه فنی کشاورزی
پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
abonajmi@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۰ تاریخ پذیرش:۱۳۹۷/۲/۱۰

چکیده

امروزه کیفیت محصولات غذایی و کشاورزی نقش اساسی در انتخاب و خرید این محصولات ایفا می‌کند. کیفیت درونی از اصلی‌ترین شاخص‌های انتخاب محصول است که به روش‌های ظاهری (بینایی، بویایی، لامسه) قابل تشخیص نیستند. بنابراین برای کیفیت‌سنجی درونی روشی نیاز است که بدون آسیب رساندن به بافت محصول در کمترین زمان ممکن و با بالاترین دقت توانایی تشخیص را داشته باشد. از این‌رو روش پردازش سیگنال‌های صوتی در درجه‌بندی، جداسازی و بافت‌سنجی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این بررسی کاربرد سه روش مرسوم پالس، ضربه آکوستیک، ارتعاش آکوستیک در تشخیص کیفیت درونی محصولات کشاورزی با استفاده از پردازش سیگنال‌های صوتی برای محصولاتی مانند کیوی، هندوانه، پسته، انبه و ... ذکر شده است. نتایج حاصل از این پژوهش‌ها نشان دهنده این است که روش پخش‌آوایی[1] توانایی بالایی برای تشخیص بافت و کیفیت داخلی محصولات کشاورزی به صورت غیرمخرب دارا بوده و با پیشرفت علم الکترونیک می‌تواند درکنار آن سیستم‌های برخط جداسازی و تشخیص کیفیت راه‌اندازی گردد.

واژگان کلیدی: سیگنال صوتی، غیرمخرب، کیفیت‌سنجی درونی، محصولات کشاورزی

۱. مقدمه

اصطلاح کیفیت، درجه برتری یک محصول یا تناسب آن برای استفاده خاص تعریف می‌شود. کیفیت محصول شامل ویژگی‌های حسی مانند ظاهر، بافت، طعم و عطر، خواص مکانیکی، ترکیبات شیمیایی، ارزش‌های تغذیه‌ای، خواص عملکردی و شکل ظاهری (لهیدگی، وجود لکه‌های قهوه‌ای) می‌باشد [۱]. کیفیت به عوامل متعددی ازجمله، فرهنگ و نحوه مصرف جامعه، سن، سلیقه و جنس مصرف‌کننده بستگی دارد. ارزیابی کیفیت محصولات کشاورزی با دو روش مخرب یا غیرمخرب انجام می‌گیرد که شامل شیءگرا (مبتنی بر قرائت‌های ابزار اندازه‌گیری) و فردگرا (مبتنی بر قضاوت انسانی) می‌باشد [۲]. به غیر از روش‌های مرسوم آزمون‌های مکانیکی و حسی، آزمون‌های نوین متعددی برای ارزیابی کیفیت محصولات کشاورزی نظیر میوه‌ها، سبزی‌ها و فرآورده‌ها توسعه یافته‌اند و بر اساس اصول اندازه‌گیری‌شان

به روش‌های اپتیکی، دینامیکی و الکترومغناطیس تقسیم‌بندی می‌شوند [۳]. مطابق جدول ۱ در رقابت با آزمون‌های فوق، آزمون‌های آکوستیکی یا صوتی به‌طور فزاینده‌ای در صنعت و کشاورزی به کار می‌روند. در صنایع غذایی این روش می‌تواند برای درجه‌بندی محصولات، تعیین رسیدگی یا سفتی میوه‌ها، تردی[۲] محصولات، جداسازی تخم‌مرغ‌های شکسته و حتی تعیین محتوای رطوبتی میوه نیز استفاده می‌شود. شرط لازم آن است که صفت مورد ارزیابی با رفتار ارتعاشی محصولات در ارتباط باشد به عبارت ساده‌تر آن صفت‌ها قابل‌شنیدن باشند [۴].

جدول ۱. اندازه‌گیری‌های متغیرهای کیفی محصولات باغی [۲]

روش	روش استفاده شده	مؤلفه قابل اندازه‌گیری
آزمون حسی	استفاده از یک یا چند حس از حواس پنجگانه	ارجحیت، قابلیت پذیرش و میزان علاقه به محصول توسط مصرف‌کنندگان و یا تفاوت‌های موجود بین محصولات و ویژگی‌های آنها
مکانیکی	آزمون پانچ	تردی و سفتی
	آزمون فشردگی تک‌محوری	مدول الاستیسیته، تنش و کرنش گسیختگی
اپتیکی	آنالیز تصویر	اندازه، شکل، رنگ و عیوب خارجی
	اسپکتروسکوپی انعکاسی، عبوری و جذبی	رنگ، اجزای شیمیایی و عیوب داخلی
	اسپکتروسکوپی لیزری	سفتی، ویسکوالاستیسیته، عیوب و شکل
	تصویربرداری اشعه ایکس	حفره درونی و ساختار و رسیدگی
دینامیکی	تحریک ارتعاشی	سفتی، ویسکوالاستیسیته و رسیدگی
	صوتی	سفتی، ویسکوالاستیسیته، حفره درونی و چگالی
	فراصوت	حفره و ساختار درونی، سفتی و تردی
الکترومغناطیسی	امپدانس	رطوبت، مقدار قند، چگالی و حفره درونی
	MR/MRI	مقدار قند، روغن، رطوبت، عیب و ساختار داخلی

به‌طورکلی خواص الکترومغناطیسی (اغلب نوری) مربوط به ظاهر، خواص مکانیکی به بافت و خواص شیمیایی به طعم (طعم و عطر) وابسته است. ابزارها می‌توانند قضاوت‌های انسانی را با تقلید از روش‌هایی که مردم محصول را آزمایش می‌کنند یا با اندازه‌گیری خواص بنیادی و ترکیبی از آنها از نظر ریاضی به منظور طبقه‌بندی کیفیت، شبیه‌سازی کنند [۵]. ویژگی‌های کیفی مختلف برای پذیرش میوه‌ها توسط مصرف‌کنندگان وجود دارد؛ بنابراین تولیدکنندگان و توزیع‌کنندگان میوه در اندازه‌گیری این معیارها علاقه‌مند هستند. با توجه به روش‌های قابل اعتماد غیرمخرب، امکان جایگزینی آزمون‌های مخرب مانند تحلیل حسی و اندازه‌گیری‌های ابزار ممکن است [۶]. بنابراین، توسعه روش‌های غیرمخرب تشخیص کیفیت نیازهای در حال رشد بخش تازه‌خوری و فراوری محصولات کشاورزی را تضمین می‌کند. کاربرد تجاری این روش‌ها برای تولیدکنندگان و نیز مصرف‌کنندگان و توزیع‌کنندگان مفید خواهد بود. پیشرفت‌های علمی موجب دسترسی آسان، افزایش تولید محصولات با کیفیت و افزایش درآمد کشاورزان شده و همچنین توزیع‌کنندگان قادر خواهند بود، انتظارات مصرف‌کنندگان برای محصولات با کیفیت یکسان را فراهم نمایند. تقاضای عمومی برای محصولات کشاورزی با کیفیت در آینده افزایش خواهد یافت و منجر به افزایش در دسترس

بودن روش‌های پیچیده، حسگرها و دستگاه‌های غیرمخرب مناسب برای اندازه‌گیری شاخص‌های کیفیت خواهد شد [۷]. طی سال‌های گذشته پیشرفت‌های زیادی در توسعه روش‌های غیرمخرب برای ارزیابی یا بازرسی پارامترهای کیفیت میوه‌ها ازجمله عیوب داخلی، همچنین طعم و مزه، محتوای قند و غیره با استفاده از حسگرها صورت گرفته است؛ که اغلب تنها یک ویژگی کیفی را اندازه‌گیری می‌کند اما به تازگی بهینه‌سازی روش‌های ترکیبی حسگرها برای اندازه‌گیری کیفیت مورد علاقه پژوهشگران واقع شده است [۸]. هدف کلی از این بررسی، مروری بر انواع روش‌های صوتی در تشخیص کیفیت درونی و مقایسه اجمالی این روش‌ها و همچنین آشنایی با ابزارهای لازم برای ارزیابی کیفیت درونی محصولات کشاورزی و غذایی مستقل از انسان است.

۲. امواج صوتی

نوسان ممتد یک محیط الاستیک می‌تواند تحت شرایطی باعث ارتعاش مولکول‌های هوای مجاور و تغییرات مداوم هوا گردد که این تغییر فشار به‌طور محدود و جزئی کمتر و بیشتر از فشار اتمسفر است. این موج به صورت طولی در هوا منتشر گردیده و در محدوده معینی از نظر فرکانس و دامنه برای انسان قابل درک است و به آن صوت می‌گویند. امواج صوتی شکلی از امواج مکانیکی طولی هستند؛ که برای درک حسی صوت، نیاز به اندازه‌گیری فرکانس و بلندی صوت است. ویژگی‌های کلی امواج صوتی در جدول ۲ ذکر شده‌اند.

جدول ۲. ویژگی‌های امواج صوتی [۸]

ویژگی	تعریف	واحد
دامنه یا بزرگی	تغییرات کمیت موج نسبت به نقطه تعادل بوده که با توجه به شکل موج دارای یک قله و یک دره است.	–
فرکانس	تعداد سیکل‌های ارتعاشی کامل در ثانیه است.	Hz
شدت صوت	مقدار انرژی صوتی است که در واحد زمان از واحد سطح می‌گذرد.	W/m^2
فشار صوت	عبارت است از نیروی وارد بر سطح.	$Pa(N/m^2)$
توان صوت	مقدار انرژی صوتی است که در واحد زمان در منبع صوتی تولید می‌شود.	W
بلندی صوت	ترازهای یکسان در فرکانس‌های مختلف به یک اندازه درک نمی‌شوند. یک مشخصه درک است.	db

سنجش تغییرات دامنه فشار صوت از دامنه‌های دیگر (شدت و توان) عمومی‌تر است. از این‌رو در مباحث اندازه‌گیری صوت، فشار صوت مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد. معادله موج فشاری در رابطه ۱ آمده است:

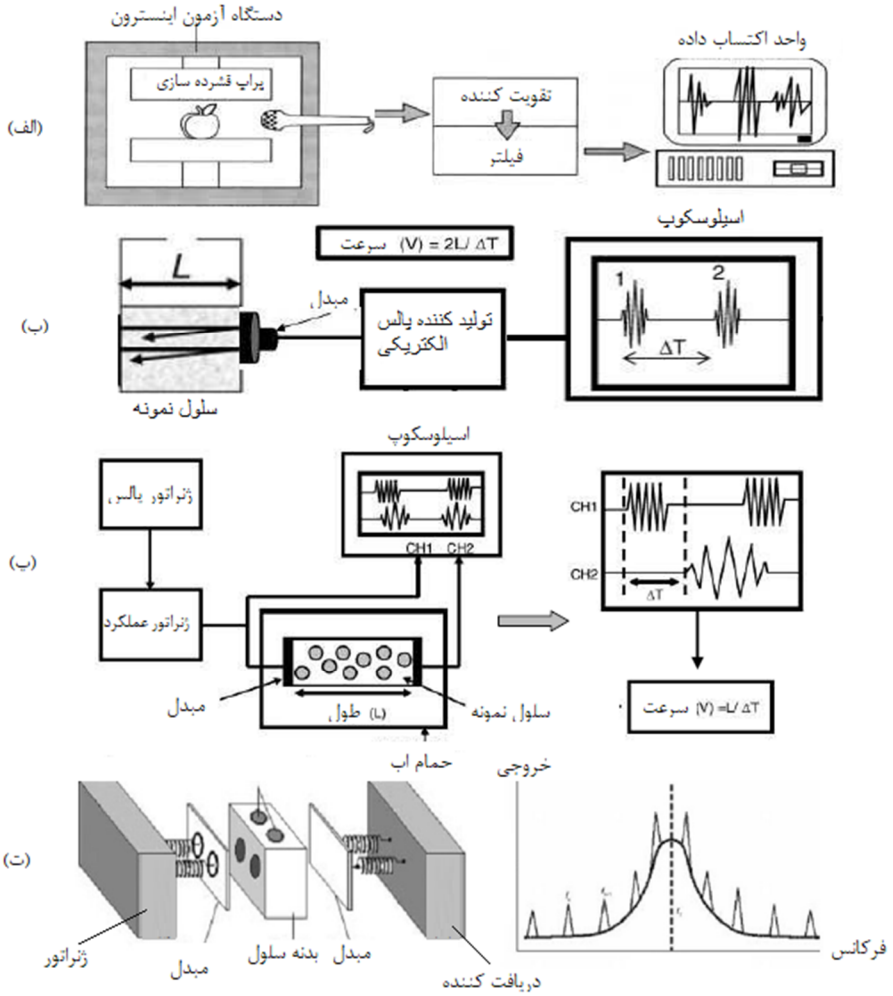
$$P(t) = P_0.\sin(\omega\, t + \varphi) \qquad (۱)$$
$$\omega = 2\pi f$$

$P(t)$ دامنه فشار در زمان P_0، t حداکثر دامنه فشار محیط، ω سرعت زاویه‌ای، φ اختلاف فاز است[۹].

۳. رابطه صوت و کیفیت‌سنجی محصولات کشاورزی و غذایی

در سالیان اخیر پژوهش‌های زیادی در زمینه کیفیت‌سنجی با کمک صوت انجام گرفته است؛ که در بیشتر موارد به نتایج مطلوبی منتهی شده است. صدا از طریق انتشار در مواد غذایی به عنوان امواج مکانیکی باعث فشرده‌سازی متناوب

می‌شود. این امواج صوتی طول موج، سرعت، فرکانس، فشار و دوره مشخصی دارند. تعامل امواج صوتی با ماده موجب تغییر سرعت و تضعیف امواج صوتی از طریق مکانیزم جذب و یا پراکندگی می‌شود. برای فناوری‌های صوتی، مطابق شکل ۱، چهار ابزار اصلی اندازه‌گیری شامل روش اندازه‌گیری میکروفون[۳]، روش فراصوت پالس-پژواک[۴]، روش زیر و بم[۵] و روش‌های رزونانس[۶] به کار می‌رود [۱۰].



شکل ۱. الف) روش اندازه‌گیری میکروفون ب) روش فراصوت پالس-پژواک پ) روش زیر و بم ت) روش رزونانس [۱۰]

روش‌های رایج برای کیفیت‌سنجی به کمک صوت شامل: ۱- پالس صوتی ۲- ضربه آکوستیک ۳- ارتعاش آکوستیک که هریک از این روش‌ها با توجه به تعیین نوع شاخص کیفیتی (بافت، تردی، آبدار بودن، ...) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱-۳. پالس صوتی

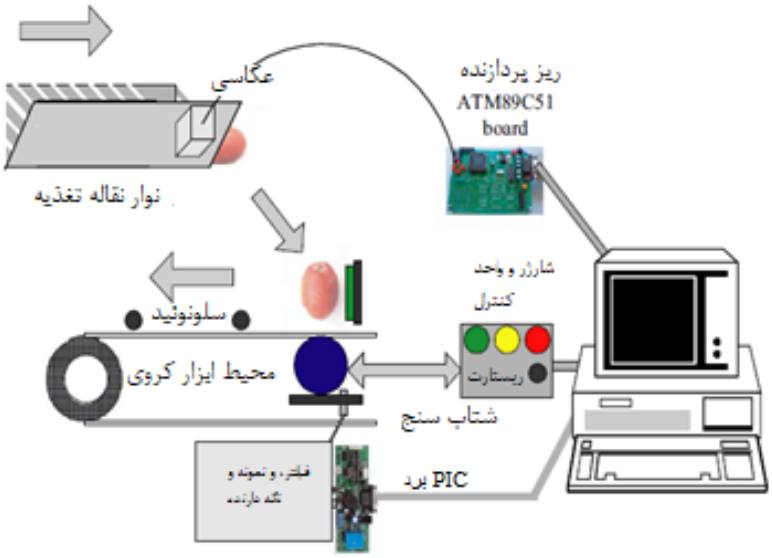
موارواتسیو و همکاران، (۱۹۹۷) تحقیقی بر روی تعیین بافت میوه کیوی به روش پالس صوتی و مقایسه آن با آزمون فشار (پانچ) انجام دادند که نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری‌های آنها نشان می‌دهد که روش صوتی با روش نفوذ سنجی متعارف برای تعیین سفتی بافت کیوی با دقت بالایی هم‌راستا می‌باشد [۱۱].

تنگ سان و همکاران، (۲۰۱۰) در بررسی خود در مورد (ارزیابی کیفیت داخلی هندوانه/ خربزه با فناوری‌های صوتی و مقایسه با دیگر روش‌ها) دریافتند، عبور موج صوتی یا بازگشت (منعکس شدن) یا مشخصات صوتی منعکس‌شده از بافت محصولات کشاورزی حاوی اطلاعاتی است، که اثر متقابل بین موج صوت و محصول کشاورزی را نشان می‌دهد. مشخصه‌های صوتی مانند ضریب میرایی، چگالی انتقال، امپدانس صوت و فرکانس طبیعی را می‌توان از انعکاس یا انتقال موج صوتی به‌دست آورد. محصولات مختلف کشاورزی به دلیل نوع بافت داخلی، دارای مشخصات گوناگون صوتی هستند. در سیستم بازرسی کیفیت با استفاده از فناوری‌های صوتی ابتدا موج صوتی توسط میکروفن جمع‌آوری و سپس تبدیل به سیگنال‌های الکتریکی می‌شود. سیگنال الکتریکی تقویت شده توسط یک مدار پردازش فیلتر می‌شوند و نمونه‌برداری توسط رایانه انجام می‌گیرد.

در این پژوهش ارتباط بین انتقال سرعت موج صوتی و SSC[۷] (حجم محلول مواد جامد) هندوانه بررسی شد و بهترین رابطه ضریب برای موقعیت‌های مختلف قابل‌توجه و وضعیت رشد هندوانه ۰/۸۱ تا ۰/۹۵ بوده است [۱۲].

۲-۳. ضربه آکوستیک و تحلیل پاسخ صوتی ضربه

یک روش رضایت‌بخش برای ارزیابی کیفیت میوه بر اساس تحلیل پاسخ صوتی ضربه غیرمخرب وارده به میوه می‌باشد. نمونه آزمایشی آزادانه بر روی یک مبدل نیروی با جرم شتابی به حرکت درآورده می‌شوند. تحلیل پاسخ صوتی حاصل از ضربه در فرکانس یا دامنه زمان تفسیر می‌شوند؛ و نتایج بیانگر همبستگی قوی بین پاسخ ضربه و کیفیت بافت و میزان رطوبت میوه است. از این روش در شناسایی استحکام بافت میوه‌هایی مانند سیب، انبه، هلو و گوجه‌فرنگی استفاده شده است، همبستگی بین پاسخ ضربه و صفات حسی، مانند: آبدار بودن و کیفیت و یا وضعیت پرزداری نیز برای سیب و هلو تعیین شده است [۱۳]. سیتین و همکاران (۲۰۰۴) به طبقه‌بندی پسته خندان و بسته با استفاده از روش ضربه آکوستیک پرداخته‌اند که در این رابطه یک الگوریتم برای جدا کردن پسته بسته از پسته خندان توسعه داده شد. در این پژوهش آنها توانستند پسته بسته را با دقت بیش از ۹۹٪ در مجموعه آزمون تفکیک کنند [۱۵]. فدریکو هان (۲۰۰۴) به طبقه‌بندی انبه از لحاظ استحکام بافت پرداخت در این پژوهش با استفاده از الگوریتم تشخیص رگرسیون و استنباط قوی[۸] توکی و اندرو [۱۶] توانست استحکام انبه را با دقت ۹۵/۷ درصد شناسایی کند. فرایند این کار در شکل ۲ نشان داده شده است. وی توانست با شبیه‌سازی مدت زمان نگهداری میوه انبه در سوپرمارکت، انبه را با استفاده از شتاب سنج پیزوالکتریک با سرعت یک عدد میوه در هر ثانیه با مشخصه کیفی سخت، نرم و بسیار نرم با دقت۹۰٪ طبقه‌بندی کند [۱۷].



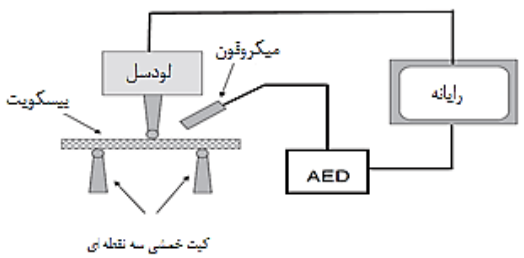
شکل ۲.شماتیکی از سیستم کنترل و جداسازی انبه [۱۶]

سعادتی‌نیا و همکاران، (۱۳۹۳) در تحقیقی در زمینه ارزیابی رسیدگی هندوانه با استفاده از تحلیل صوت حاصل از اعمال ضربه به آن، تأثیر دو متغیر مستقل محل اعمال ضربه (دو طرف خط مرکزی هندوانه و مقابل محل اتصال به ساقه) و شدت ضربه ($kg\ mms^{-1}$ ۱۵/۰۸،۱۲/۰۹ و ۱۷/۱۱) بر تغییرات خواص سیگنال‌های صوتی به‌دست آمده، مطالعه و ارتباط آنها با تغییرات خواص بیومکانیک بافت گوشت و پوست از جمله ضریب سفتی شاخص میزان رسیدگی هندوانه به عنوان متغیر وابسته بررسی نمودند. نتایج نشان می‌دهد که سطوح مختلف شدت و محل اعمال ضربه تأثیر معنی‌داری روی نتایج آزمون صوتی دارد، به‌گونه‌ای که اعمال ضربه به اطراف خط مرکزی هندوانه و شدت ضربه $kg\ mms^{-1}$ ۱۷/۱۱ بهترین نتیجه را در بر داشته است [۱۷]. جهانگیری و همکاران، (۱۳۹۵) از روش صدای خرد شدن، شاخصی برای تعیین کیفیت میوه خیار به‌دست آوردند. هدف اصلی این تحقیق استفاده از روش آکوستیک برای ارزیابی بافت خیار بوده است. میزان فشار صوت در فرکانس غالب به عنوان مرجعی برای ارزیابی بافت خیار در نظر گرفته شد و به وسیله آن شاخص فشار صوت را تعریف نمود، سپس رابطه شاخص فشار صوت با مدت زمان نگهداری خیار، شرایط نگهداری و محل اعمال ضربه را بررسی نمودند [۱۸]. گرایمی و همکاران، (۲۰۱۰) به تحلیل پاسخ ضربه آکوستیک در تشخیص بافت سیب‌های درمان شده با پالس میدان الکتریکی پرداخته، و به این نتیجه رسیدند که بهتر است شاخص جداسازی میوه سیب به صورت آکوستیک اندازه‌گیری شود. زیرا این روش برای مشخص کردن مشخصه میزان خسارت مناسب است و نسبت به شاخص تخریب هدایت به‌طور عمومی‌تر استفاده می‌شود. به این دلیل که استفاده از کل سیب در محیط آبی می‌تواند باعث حساسیت به تغییرات در میدان الکتریکی به دلیل بافت درونی و هدایت الکتریکی محیط آب شود. اثرات میدان الکتریکی پالسی[۹] نیز می‌توانند به شکل نمونه و جهت‌گیری فضایی آنها بستگی داشته باشند [۶]. حسین پور و همکاران (۲۰۱۱) مطالعه روی تشخیص سرعت بالا سیب‌زمینی از کلوخه با استفاده از سیستم هوشمند مبتنی بر آکوستیک انجام دادند. برای این کار حدود ۵۰۰ کیلوگرم مخلوط غده سیب‌زمینی و کلوخه بر روی یک نوار نقاله ریخته شد و سیگنال صوتی به‌دست آمده در اثر برخورد با یک ورق فولادی در چهار

سرعت مختلف توسط میکروفون ثبت شد، سپس روی سیگنال‌ها پردازش صورت می‌گیرد. در نهایت ویژگی‌های بالقوه را از آنها استخراج و از یک شبکه عصبی پرسپترون[10] چندلایه با استفاده از الگوریتم تکثیر بازگشتی برای تشخیص الگو استفاده نمودند. در سرعت نقاله m/s ۱ دقت تشخیص سیستم ارائه شده به ترتیب حدود ۹۷/۳٪ و ۹۷/۶٪ برای سیب‌زمینی و کلوخه‌ها بود [۱۹]. زدونک و همکاران (۲۰۰۸) به مقایسه سه روش برای نظارت بر تغییرات کیفیت سیب در طول انبارمانی، آزمون پانچ[11] با انتشار آکوستیک و فن همبستگی بین فضا و زمان، به بررسی استحکام، میزان انتشار آکوستیک و تفاوت ضریب همبستگی متقابل با استفاده از این روش‌ها پرداختند. بر اساس نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، آزمون نقطه عطف با انتشار صوتی نیز تغییرات قابل‌توجهی را با زمان ذخیره‌سازی داشته و این آزمون‌ها می‌تواند برای نظارت بر کیفیت در طول ذخیره‌سازی مورد استفاده قرار گیرند. همچنین این روش‌ها اطلاعاتی در مورد خواص مکانیکی مواد به‌خصوص در مورد ویژگی‌های شکست مواد ارائه می‌دهند، بنابراین می‌توان برای نظارت بر خواص بافت مانند سختی، تردی و ملس بودن استفاده نمود [۲۰]. البتاوی (۲۰۰۸) از روش ضربه آکوستیک برای تشخیص حفره درونی غده سیب‌زمینی استفاده نمود. او از یک سیستم مرتب‌سازی آکوستیک برای تشخیص قلب توخالی در غده سیب‌زمینی (رقم Spunta) استفاده نمود. سامانه شامل میکروفون، سخت‌افزار پردازش سیگنال دیجیتال و تجهیزات حمل مواد بود. این مطالعه نشان داد که امکان تشخیص غده با حفره درونی از غده‌های سالم وجود دارد. برای اخذ نتایج از دو ویژگی سطح سیگنال و شیب سیگنال استفاده شده که شیب سیگنال از رابطه ۲ به‌دست می‌آید. همبستگی بین فرکانس‌های رزونانس در موقعیت‌های تشخیص داده شد بسیار بالا (R=۰/۹۷) و همبستگی پایین‌تر بین نسبت امپدانس (R=۰/۶۵) به‌دست آمده است [۲۱].

$$G_x = \left| I_{(x-\text{gap})} - I_{(x+\text{gap})} \right| \qquad (۲)$$

دماته و همکاران (۲۰۱۴) به شبیه‌سازی صدای گاز گرفتن و رابطه آن با سفتی و طراوت سیب به کمک آزمون صوتی پرداختند. در این تحقیق آنها سه رقم سیب سفید کانادا[12]، طلایی[13] و فوجی[14] را مورد ارزیابی قرار دادند؛ و به این نتیجه رسیدند که با کاهش صدای دریافتی حین گاز گرفتن، کیفیت محصول نیز در سطح پایینی قرار داشته و در نهایت رابطه مستقیم بین صدا و استحکام بافت سیب به‌دست آوردند [۲۲]. چن و همکاران (۲۰۰۵) در تحقیق خود، تردی مواد غذایی بر اساس رفتار نیرو/ جابه‌جایی و ماهیت آکوستیک آنها با استفاده از یک آشکارساز پخش آوایی[15] متصل به آنالایزر بافت را مورد مطالعه قرار دادند که در شکل ۳ آمده است. در این پژوهش شش نوع بیسکویت مورد استفاده قرار گرفت، و سیگنال‌های نیرو–جابه‌جایی و سیگنال‌های صوتی در طول شکستن بیسکویت‌ها را ثبت نمودند. برای هر سیگنال صوتی ثبت شده کاهش ناگهانی در نیروی فشرده‌سازی وجود دارد. تجزیه و تحلیل منحنی نیرو–جابه‌جایی، ارتباط بین مشتق دوم منحنی نیرو–جابه‌جایی و رویداد آکوستیک را نشان می‌دهد. یکی از مزایای بزرگ دستگاه شوک الکتریکی خارجی خودکار و روش شمارش ارقام، آزمون در هوای آزاد است که نیازی به محیط عایق صدا ندارد [۲۳].

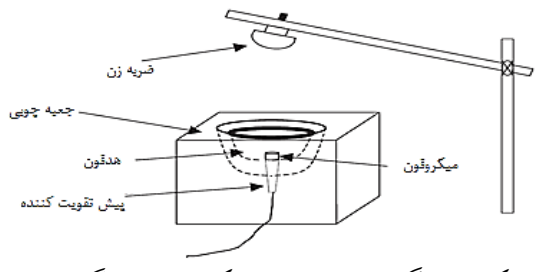


شکل ۳. نمودار شبیه‌سازی تنظیمات ابزار دقیق تحلیل انالایزر قدرت تشخیص / شناسایی سیگنال‌ها و آکوستیک AED، پخش آوایی [۲۳]

سجادی (۱۳۹۶) در پژوهشی کاربرد پردازش سیگنال دیجیتال صدای حاصل از برخورد در تشخیص دانه‌های گندم سالم از دانه‌های آفت‌زده را مورد بررسی قرار داد. وی به کمک شبکه عصبی (۲-۶-۱۰) و پردازش موجک توانست دانه‌های سالم و آفت دیده را به ترتیب با دقت ۹۸ و ۹۳ درصد تشخیص دهد. تبدیل موجک روشی جهت پردازش سیگنال در حوزه زمان- فرکانس است، در این تبدیل سیگنال اصلی به سیگنال‌هایی که از تغییر مقیاس و تغییر مکان تابع موجک مادر به‌دست می‌آیند، تبدیل می‌شود. موجک مادر از رابطه ۳ به‌دست می‌آید.

$$\psi_{a,b}(X) = \frac{1}{\sqrt{|a|}}\psi\left(\frac{x-b}{a}\right), a > 0 \qquad (۳)$$

a و b مقادیر حقیقی بوده و به ترتیب پارامتر مقیاس و انتقال می‌باشند [۲۴]. دیزما و همکاران (۲۰۰۴) به تشخیص کیفیت داخلی هندوانه بدون هسته با پاسخ ضربه آکوستیک پرداختند. در این پژوهش آنها به بررسی بافت‌های بیولوژیکی و رفتار ارتعاشی میوه در اثر اعمال ضربه و تحلیل صوت خروجی از محصول به عنوان یک شاخص برای تشخیص بلوغ و پس از برداشت در نظر گرفته‌اند. شکل ۴ نتایج این تحقیق را نشان می‌دهد که پارامترهای اندازه باند[۱۶]، به‌دست آمده توسط جمع بزرگی از طیف نرمال بین دو فرکانس معین، به‌خصوص بین محدوده ۸۵ و۱۶۰ هرتز بهترین شاخص در ارتباط با کیفیت داخلی با حداقل همپوشانی بین هندوانه سالم و توخالی است [۲۵].



شکل۴. دستگاه صوتی: موقعیت میکروفون، ضربه‌گیر و اجزای ساختاری [۲۵]

۳-۳. ارتعاش آکوستیک

به‌طور عمده، اندازه‌گیری‌های آکوستیک بر اساس ضریب پاسخ میوه به تحریک است. ارتعاشات صوتی شامل فرکانس‌های قابل شنیدن بین ۲۰Hz و ۲۰ kHz است؛ امواج صوتی و فراصوتی می‌توانند از طریق انتقال در مواد، منعکس، شکسته و یا پراکنده شوند. اندازه‌گیری مستقیم نیز ممکن است در موارد خاص مانند تشخیص لارو حشرات در یک دسته از میوه‌ها صورت گیرد. در تحقیقات محققان لاروهای گریپ‌فروت آلوده و گیاهان با اندازه‌گیری صوتی مشخص شده است [۱۳]. مولینا و همکاران (۲۰۰۹) به ارزیابی چند منبع مختلف برای اندازه‌گیری سفتی سیب با چندین روش غیرمخرب پرداختند که نتایج کار خود را این‌گونه شرح می‌دهند. هدف از این مطالعه ارزیابی تأثیر منابع مختلف اندازه‌گیری در سه آزمون غیرمخرب پاسخ صوتی حسگرهای استحکام صدا[۱۷] (AFSs)، حسگر سینکلر[۱۸] SIQ-FT و آزمون ضربه و ارزیابی قابلیت‌های مربوط به تبیین آنها از نظر بلوغ میوه در دو تاریخ مختلف برداشت، ورم (آماس) قبل و بعد از اعمال تیمار محیط مرطوب و خشک و رسیدگی میوه بعد از دوره‌های مختلف انبارمانی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد اندازه‌گیری به روش ضربه به تغییرات آماس (ورم) حساس بوده و ضریب همبستگی بالاتر با آزمون‌های بافت مرجع نسبت به اندازه‌گیری‌های صوتی می‌باشد و تنها روش‌های مناسب برای تمایز بین مراحل اولیه بلوغ در میوه‌های تیمار شده در طول دوره انبارمانی بودند [۲۶]. تانیواکی و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از روش ارتعاش آکوستیک سفتی بافت کلم را اندازه‌گیری نمودند. در این پژوهش با استفاده از روش ارتعاشات آکوستیک بافت‌های شش رقم کلم با نمونه‌برداری از چهار برگ بیرونی کلم و استفاده از پروب سفتی سنج، نفوذ صورت گرفته و سیگنال‌های ارتعاشات صوتی در طول نفوذ با استفاده از حسگر پیزوالکتریک اندازه‌گیری شد. پارامترهای مهم ازجمله انرژی ارتعاش امواج (مجموع انرژی بالقوه و جنبشی امواج) تبیین گردید. این انرژی E توسط دامنه a از

یک موج و فرکانس آن f تعریف می‌شود [۲۷]. رابطه ۴ در همین راستا یک شاخص بافت[۱۹] جدید ، "تراکم انرژی"، معرفی شده است که توسط ادغام دامنه مربع سیگنال‌های بافت ضرب شده با یک عامل از یک باند فرکانس تعیین شده است. در نتیجه تفاوت معنی‌داری بین رقم کلم و کلم بهاره و زمستانه مشاهده نمودند.

$$E \propto (2\pi f)^2 a^2 \qquad (۴)$$

دامنه a را می‌توان با کمک مربع میانگین ریشه‌های دامنه به صورت $\sqrt{2}\, a_{\mathrm{rms}}$ بیان کرد. در اینجا فرکانس به عنوان فرکانس مرکزی نماینده هر باند فرکانس را با $\sqrt{f_l f_u}$ تعریف می‌شود. که در آن f_l و f_u به ترتیب نشان دهنده کمترین و بالاترین فرکانس هر باند فرکانسی تعیین شده توسط فیلتر چندگانه ۱/۲ اکتاو است. بر این اساس، چگالی انرژی می‌تواند به صورت رابطه ۵ تعریف شود [۲۸].

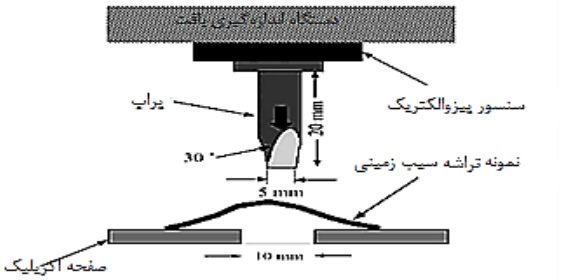
$$\mathrm{TI} = (f_l f_u)\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} V_i^2 \qquad (۵)$$

در معادله فوق V_i دامنه حاصل از سیگنال‌های بافت محصول می‌باشد.

در تحقیق دیگر تانیواکی و همکاران (۲۰۰۹) به ارزیابی کیفی پس از برداشت خرمالو رقم فویو[۲۰] و تایشو[۲۱] با استفاده از روش ارتعاش غیرمخرب و روش ارتعاش صوتی پرداختند. آنها تغییرات دوره‌ای در شاخص کشش[۲۲] و شاخص بافت این دو رقم را مورد بررسی قرار دادند. همچنین شاخص کشش را با استفاده از رابطه ۶ به‌دست آورند. در این پژوهش از یک روش ارتعاشی غیرمخرب با استفاده از یک لیزر داپلر ارتعاشی[۲۳] برای اندازه‌گیری فرکانس دوم رزونانس (f_2) نمونه‌های خرمالو استفاده شده است. الگوی زمان‌بندی تغییرات در شاخص بافت بین خرمالو فویو و تایشو متفاوت به‌دست آمده و کاهش شدیدی در شاخص بافت نوع فویو مشاهده شده است.

$$\mathrm{EI} = {f_2}^2 m^{2/3} \qquad (۶)$$

در این رابطه، f_2 فرکانس دوم رزونانس نمونه و m جرم نمونه است [۲۹]. تانیواکی و همکاران (۲۰۱۰) بافت چیپس‌های سیب‌زمینی را با استفاده از روش تجزیه و تحلیل جدید با روش ارتعاش صوتی اندازه‌گیری نمودند که در شکل ۵ قابل مشاهده است. آنها در این پژوهش نشان دادند که شاخص بافت بالاتر از ۱۶۰۰ هرتز منعکس‌کننده تردی تراشه‌های سیب‌زمینی است. داده‌های فیلتر شده از هر باند فرکانسی با استفاده از شاخص بافتی تعریف شده است [۳۰].



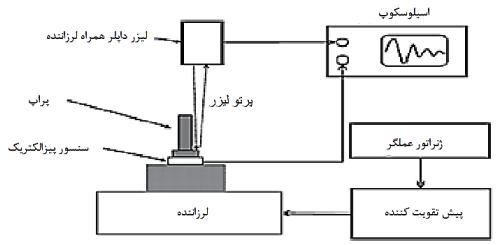
شکل ۵. نمودار تنظیم آزمایشی پروب برای اندازه‌گیری سیگنال‌های حاصل از شکست بافت نمونه‌های تراشه (چیپس) سیب‌زمینی [۳۰]

ایوتانی و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی یک روش ارتعاش صوتی برای ارزیابی بافت مواد غذایی با استفاده از حسگر شتاب‌سنج پرداختند، که در این روش ترکیبی از روش ارتعاش صوتی با عنصر پیزوالکتریک برای اندازه‌گیری بافت مواد غذایی استفاده شده است. عنصر پیزوالکتریک ارتعاش یک پروب را تشخیص می‌دهد. پاسخ فرکانسی حسگر پیزوالکتریک مورد استفاده برای روش ارتعاش صوتی با یک لیزر داپلر ارتعاشی مورد بررسی قرار می‌گیرد که در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده در این پژوهش دریافتند که استفاده از یک حسگر پیزوالکتریک برای اندازه‌گیری بافت غیر عملی است، و باید با شتاب‌سنج جایگزین شود. بر طبق این جایگزینی به یک شاخص بافت

انرژی جدید[۲۴] دست یافتند. این شاخص از طریق رابطه ۷ محاسبه می شود.

$$\mathrm{ETI}(\mathrm{V^2s}) = \left(\frac{1}{t}\right) \times \left(\frac{1}{f_m}\right)^2 \times \sum (Vi)^2 = (1/t) \times (1/f_l f_u)^2 \times \sum (Vi)^2 \quad (۷)$$

در اینجا Vi ولتاژ خروجی شتاب‌سنج است. و f_u و f_l (Hz) فرکانس‌های مرزی بالا و پایین یک باند فرکانس داده شده‌اند. محصول f_u و ${f_m}^2$است، f_m میانگین هندسی افقی یک باند فرکانس در شکل ۶ مشخص است [۳۱].



شکل ۶. تنظیم تجربی برای مقایسه سیگنال‌های خروجی از حسگر پیزوالکتریک و LDV [۳۱].

٤. آکوستیک و کیفیت‌سنجی

وانیچینگ و همکاران (۲۰۱۱) به طبقه‌بندی رسیدگی انبه (Cv Nam Dokmai) به روش غیرمخرب بر اساس خواص فیزیکی، مکانیکی و اپتیکی پرداختند. طی ۷۷ تا ۱۱۵روز تنوع اندازه، وزن مخصوص، میزان ماده جامد محلول، اسیدیته کل، رنگ سطح، پاسخ صوتی (ضریب سختی بر اساس فرکانس رزونانس و وزن میوه)، پاسخ ضربه (حداکثر سرعت / زمان معین) مورد بررسی قرار گرفت، و در نهایت عملکرد مدل ساده برای طبقه‌بندی چهار سطح بلوغ با دقت ۸۹/۰٪ به‌دست آمده است که مناسب برای کاربرد عملی است [۳۲]. ابونجمی و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی استفاده از تجزیه و تحلیل آکوستیک در ارزیابی کیفیت تولیدات مواد غذایی و کشاورزی پرداختند. در این مطالعه خلاصه‌ای از ویژگی‌های صوتی محصولات غذایی کشاورزی و همچنین اهمیت و کاربرد این فناوری در صنایع غذایی و کشاورزی را ذکر کردند از جمله این ویژگی‌ها خواص آکوستیک مواد غذایی برای نشان دادن صفات کیفی مهم مانند حالت، تردی، آردی شدن[۲۵]، استحکام، فعالیت آب و غیره بود. همچنین نتایج بررسی شده در این بررسی به وضوح نشان می‌دهد که در دسترس بودن و ارزان بودن روش صوتی می‌تواند یکی از مزایای عمده در صنایع غذایی و کشاورزی باشد [۳۳]. بیاتی و همکاران (۱۳۹۲) به ارزیابی انبارمانی سیب گلاب با دو روش آکوستیکی و نفوذسنجی پرداختند، اثر انبارداری سیب گلاب در چهار گروه سیب‌های سالم و بدون پوشش، سالم و پوشش‌دار، ضربه خورده و بدون پوشش و ضربه خورده و پوشش‌دار مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای آکوستیک و نفوذسنجی شامل فرکانس طبیعی، شاخص سفتی، ضریب الاستیسیته و قدرت نفوذ، را اندازه‌گیری و مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای آکوستیکی و نفوذسنجی در طی دوره‌ای انبارداری کاهش یافته است، همچنین پارامترهای آکوستیکی و نفوذسنجی در سیب‌های سالم و پوشش‌دار در مقایسه با سیب‌های ضربه خورده و بدون پوشش به ترتیب و به‌طور متوسط ۱۴٪ و ۴۰٪ افزایش را نشان دادند [۳۴]. در جدول ۳ و ۴ پژوهش‌های انجام گرفته در بحث کیفیت‌سنجی با صوت و ارتباط بین شاخص‌های صوتی و شاخص‌های کیفیت ذکر شده است.

جدول ۳. شناسایی رابطه بین شاخص‌های صوتی و خواص کیفیت محصولات کشاورزی

ردیف	عنوان تحقیق	شاخص اندازه‌گیری صوتی–شاخص کیفیتی	پژوهشگر/سال
۱	تعیین بافت میوه کیوی به روش پالس صوتی و مقایسه آن با آزمون فشار (پانچ)	زمان انتقال موج صوتی– بافت	مورا متسو (۱۹۹۷)
۲	ارزیابی کیفیت داخلی هندوانه/خربزه با فناوری‌های صوتی، فناوری‌های پویا، برق و....	استحکام، وزن خشک، و مواد جامد محلول و... – امپدانس، ضربه صوت	تنگ سان(۲۰۱۰)
۳	طبقه‌بندی پسته بسته و باز با استفاده از فناوری ضربه آکوستیک	ضریب نفوذ و تحلیل مؤلفه اصلی ماتریس همبستگی سیگنال‌ها– پوکی یا مغز دار بودن	سیتین (۲۰۰۴)
۴	ارزیابی رسیدگی هندوانه با استفاده از تحلیل صوت در نتیجه اعمال ضربه به آن	شدت ضربه– خواص بیومکانیک هندوانه	سعادتی‌نیا (۱۳۹۳)
۵	تعیین کیفیت خیار از طریق صدای حاصل از خرد شدن	میزان فشار صوت– بافت خیار	جهانگیری (۱۳۹۵)
۶	پاسخ ضربه آکوستیک در بافت‌های سیب درمان شده با پالس میدان الکتریکی	شاخص سفتی– فرکانس و نقطه اوج دامنه سیگنال	گرایمی (۲۰۱۰)
۷	اندازه‌گیری سفتی سیب با چندین روش غیرمخرب	صوت– بلوغ میوه و سفتی بافت	مولینا (۲۰۰۹)
۸	روش ارتعاش آکوستیک برای تعیین بافت کلم	دامنه مربع سیگنال‌های– بافت	میتسوو تانیواکی(۲۰۰۸)
۹	ارزیابی کیفی پس از برداشت خرمالو رقم فویو و تایشو با استفاده از روش ارتعاش غیرمخرب و فن ارتعاش صوتی	شاخص کشش و شاخص بافت– فرکانس دوم رزونانس	میتسوو تانیواکی(۲۰۰۹)
۱۰	اندازه‌گیری بافت چیپس‌های سیب‌زمینی با استفاده از فن تجزیه و تحلیل جدید با روش ارتعاش صوتی	دامنه فرکانس– شاخص بافت	میتسوو تانیواکی(۲۰۱۰)
۱۱	روش ارتعاش صوتی برای ارزیابی بافت مواد غذایی با استفاده از حسگر شتاب‌سنج	باند فرکانس– بافت	ایوتانی (۲۰۱۳)
۱۲	تشخیص سیب‌زمینی از کلوخه با استفاده از سیستم هوشمند مبتنی بر آکوستیک	تشخیص جنس– فرکانس	حسین‌پور (۲۰۱۱)
۱۳	مقایسه سه روش برای نظارت بر تغییرات کیفیت سیب در طول انبارمانی	سفتی و ماندگاری (پخش آوایی[۲۶])	آرتور زدنک (۲۰۰۸)
۱۴	استفاده از روش ضربه آکوستیک برای تشخیص حفره درونی غده سیب‌زمینی	نقص درونی– ضربه صوتی	البتاوی (۲۰۰۸)
۱۵	بررسی تردی مواد غذایی بر اساس رفتار نیرو–جابه‌جایی و ماهیت آکوستیک آنها با استفاده از یک آشکارساز پوششی آکوستیک متصل به آنالایزر بافت،	تردی– توان صوتی	چن (۲۰۰۵)
۱۶	شبیه‌سازی صدای گاز گرفتن و رابطه آن با سختی و طراوت سیب به کمک آزمون صوتی	تن صدا– استحکام و تازگی	دماته (۲۰۱۴)
۱۷	کاربرد آکوستیک در تشخیص دانه‌های گندم آفت‌زده	تشخیص جنس– پردازش سیگنال صوتی	سید جواد سجادی (۱۳۹۶)
۱۸	طبقه‌بندی رسیدگی انبه به روش غیرمخرب بر اساس خواص فیزیکی، مکانیکی و اپتیکی	رسیدگی– فرکانس رزونانس	وانیچینگ (۲۰۱۱)

جدول ۴. برخی از پژوهش‌های انجام گرفته در رابطه با کاربرد پخش آوایی در صنایع غذایی و کشاورزی

عنوان پژوهش	نام نویسنده /سال
انتشار آکوستیک به عنوان یک ابزار برای ارزیابی تغییرات ناشی از میدان الکتریکی پالسی در بافت سیب	آرتور ویکتور(۲۰۱۶)
مقایسه آزمون پانچ، آزمون پخش آوایی و همبستگی نقاط فضا- زمان برای ارزیابی کیفیت سیب	آرتور زدنک (۲۰۰۸)
اندازه‌گیری‌های آکوستیک- مکانیکی تردی در سیب	پیازا (۲۰۱۵)
ارزیابی خواص بافتی بافت انبه با روش صوتی near-field	مارک والنت (۲۰۰۳)
پخش آوایی، رفتار تراکم و مورفولوژی خوراکی‌های خشک	هانمیک لیوتن (۲۰۰۶)
اندازه‌گیری بر خط رطوبت گندم با روش آکوستیک	مهدی لطفی (۲۰۱۵)
بررسی تردی و شکنندگی سیب به روش تماسی پخش آوایی	آرتور زدنک (۲۰۱۰)
تأثیر فعالیت آب بر انتشار صوتی نان اکسترود صاف	آگاتا مارزک(۲۰۰۷)
تأثیر Ca^{2+} و ساختارهای سلولی بر سفتی سیب و انتشار آکوستیک	سایبولسکا (۲۰۱۲)
یک دستگاه جدید برای اندازه‌گیری صوتی بافت مواد غذایی با استفاده از پروب در حال اجرا آزاد	اکیمیتو (۲۰۱۷)
ارزیابی اندازه‌گیری‌های مکانیکی صوتی و مکانیکی برای ترد شدن محصولات ویفر	چاراشانبا (۲۰۱۷)
تردی در مواد غذایی خشک و اندازه‌گیری‌های کیفی بر اساس تکنیک‌های غیرمخرب آکوستیک و مکانیکی	سیلیاو (۲۰۱۱)
نگاهی به بافت غلات اکسترود شده: ساختار و خواص صوتی	چانوری(۲۰۱۴)

آموده و همکاران (۲۰۰۶) سامانه اندازه‌گیر رطوبت‌سنج دانه بر خط[۲۷] آکوستیک را طراحی کردند. این سامانه شامل یک قیف برای تولید یک جریان دانه مداوم با سرعت حدود ۷۲ سانتی‌متر بر ثانیه است. دبی جریان به سمت یک سطح سنسور با شیب ۳۰ درجه با قطر ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشد. یک میکروفون که در زیر سطح قرار می‌گیرد، امواج صوتی تولید شده توسط ضربه دانه را دریافت و آنها را به سیگنال الکترونیکی تبدیل می‌کند. با انجام چندین آزمایش فشار صوت[۲۸] از صدای ضربه به عنوان ولتاژ خروجی اندازه‌گیری و ارتباط آنها با رطوبت دانه تعیین شده است. در این تحقیق اثرات ارتفاع رها شدن دانه و نوع سطوح ضربه (شیشه، چوب و فلز) بر روی فشار صوت، مورد بررسی قرار گرفته و رابطه بین ولتاژ خروجی و رطوبت دانه برای سه گندم به عنوان معادلات کالیبراسیون توسعه داده شده است.

این تحقیق نشان می‌دهد که رطوبت‌سنج دانه آکوستیک می‌تواند میزان رطوبت گندم را در یک ردیف معمولی از رطوبت برداشت اندازه‌گیری کند [۳۵]. زدونک و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی آشکارساز انتشار آکوستیک برای ارزیابی بافت سیب پرداختند. هدف این کار تعیین روابط بین پارامترهای ابزار و خصوصیات حسی بافت و ایجاد مدل‌های کالیبراسیون برای پیش‌بینی بافت حسی سیب با کمک آشکارساز روش پخش آوایی[۲۹] بوده است. این آزمایش پیش‌بینی خوبی از ویژگی‌های حسی بافت سیب، استحکام، آردی شدن، آب‌دار بودن، غذا و به‌طورکلی بافت را بر اساس کل میزان انتشار آکوستیک نسبت به اندازه‌گیری استحکام[۳۰] نشان داده است. در نهایت پیشنهاد کردند که با ساخت مدل‌های کالیبره شده جداگانه برای هر رقم حتی دقت بیشتری نیز به‌دست خواهد آمد [۳۶]. همچنین زدونک و همکاران (۲۰۱۱) عملکرد مدل‌های کالیبراسیون برای ارزیابی بافت حسی سیب با آشکارساز انتشار پخش آوایی را مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی مدل‌ها با استفاده از رگرسیون خطی ساده، رگرسیون خطی چندگانه[۳۱] و رگرسیون مؤلفه‌های اصلی[۳۲] برای مقادیر میانگین ۱۰ میوه تهیه و ارزشیابی شده است. مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه و رگرسیون مؤلفه‌های اصلی عملکرد بهتر برای پیش‌بینی داده‌های حسی را نسبت به مدل‌های رگرسیون خطی ساده نشان داده است.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با کالیبراسیون و ترکیب هر دو پارامتر مکانیکی و صوتی پیش‌بینی ویژگی‌های حسی بافت میوه مانند سفتی وآبدار بودن می‌تواند دقیق‌تر شود

[۳۷]. زدونک (۲۰۱۳) به بررسی استفاده از انتشار آکوستیک برای ارزیابی کیفی میوه‌ها و سبزی‌ها پرداخت.

در این پژوهش از صدای خرد شدن بافت محصولات غذایی در حین اعمال نیروی خارجی به عنوان یکی از عوامل اصلی مورد استفاده برای ارزیابی کیفیت مواد غذایی نام برده شده است. تردی و آردی شدن صفات کیفی مهمی هستند، که معمولا در لیست رتبه‌های نخست نیازهای مصرف‌کننده قرار دارند. تردی و آردی شدن مفهوم بسیار پیچیده حاوی صدا، شکستگی مشخص، تراکم و هندسه میوه و سبزی‌ها است [۳۸].

نتایج این پژوهش نشان داد که ترکیب تفسیر آزمون آکوستیک و آزمون مکانیکی مفهوم تردی محصول را به روشنی بیان می‌کنند، یعنی هرچه میوه محکم‌تر باشد، تردتر است [۳۹]. پیازا و همکاران (۲۰۱۵) به طراحی و بررسی وسیله آکوستیکی- مکانیکی برای اندازه‌گیری تردی سیب پرداختند. در این پژوهش سامانه‌ای برای تشخیص تردی سیب بر اساس ترکیب سنسورهای آشکارساز آکوستیک تجاری با آنالیزر بافت (TA.XT.plus) متناسب با سلیقه مصرف‌کننده معرفی شده است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از فن‌های ترکیبی صوتی مکانیکی روش قابل اعتمادتر و دقیق‌تر، برای تعیین کیفیت درونی میوه است. انتخاب پارامترهای مکانیکی و صوتی مؤثر در توصیف حالت شکست و حوادث آکوستیک با استفاده از تجزیه و تحلیل چند متغیر اکتشافی[۳۳] صورت گرفته است [۴۰].

۵. نتیجه‌گیری

ارزیابی بافت یکی از مهم‌ترین روش‌های تعیین کیفیت و بازار پسندی محصولات غذایی می‌باشد که به دو روش آزمون چشایی و آزمون ابزاری صورت می‌گیرد. اما باید نتایج آزمون ابزار (صوتی) با نتایج آزمون‌های مرسوم کالیبره شده تا نتایج به‌دست آمده از این آزمون با واقعیت همخوانی داشته باشد. امروزه از فناوری پردازش سیگنال‌های صوتی در درجه‌بندی، جداسازی، سورتینگ و بافت‌سنجی استفاده می‌شود. از این رو بین روش‌های غیرمخرب کنترل کیفیت مواد غذایی و کشاورزی پردازش سیگنال‌های صوتی در کنار سایر روش‌های آنالیز داده به دلیل کاهش هزینه و سرعت عمل و دقت بالا با سرعت رو به پیشرفت است، اما برای کاربردی شدن در عرصه صنعت همچنان نیازمند زمان و مطالعه بیشتر می‌باشد. با توسعه چنین فناوری، تغییراتی در تولید و بازاریابی محصول تازه رخ داده است. کاربردهای احتمالی این روش غیرمخرب برای اهداف تجاری که تا کنون قابل پیش‌بینی هستند عبارتند از: الف) شناسایی نقص‌های داخلی در میوه، حتی پس از رشد آنها؛ ب) درجه‌بندی میوه با توجه به رسیدگی و پیش‌بینی طول عمر بالقوه آنها در مدت انبارمانی. بنابراین برای این روش می‌توان برنامه‌های کاربردی بالقوه را برای زمانی که یک سامانه ساده‌تر گسترش داده شود و همچنین برای طبقه‌بندی میوه‌های درون خطی در نظر گرفته شود. در حال حاضر از نتایج پژوهش‌های انجام گرفته روی هندوانه و تخم‌مرغ برای درجه‌بندی بر خط این دو محصول، سامانه تفکیک با استفاده از فناوری پخش آوایی در کشورهایی مانند ژاپن و چین ایجاد شده است.

۶. مآخذ

[1] Sheeja P.S and Ajay Gokul A.J., "Nondestructive Quality Evaluation for Fruits and Vegetables", *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research,* Vol. 3, Issue.8, 2016,

[۲] جهانگیری، م : " تحلیل پاسخ آکوستیکی میوه خیار طی دوره انبارمانی و مقایسه آن با خواص مکانیکی "، رساله دکتری، گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ۱۳۹۵.

[۳] خوشنام، ف؛ مبلی، ح؛ حسن بیگی، ر؛ رفیعی، ش ؛ رجبی پور، ع ؛ ایوانی، ا: "تشخیص رسیدگی خربزه با روش غیرمخرب پاسخ آکوستیکی"، *مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی* ، ش ۳، ۱۳۹۱، ص. ۸۹-۱۰۲.

[۴] محمودی، ا : "ارائه یک الگوریتم مناسب مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت جداسازی پسته‌های خندان از پسته‌های ناخندان به روش آکوستیکی به صورت زمان واقعی"، رساله دکتری، گروه ماشین‌های کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ۱۳۸۵.

[5] Abbott JA., "Quality measurement of fruits and vegetables" *Postharvest biology and technology*. Vol.15, No.3, 1999, pp.207-25.

[6] Grimi N, Mamouni F, Lebovka N, Vorobiev E, Vaxelaire J. "Acoustic impulse response in apple tissues treated by pulsed electric field" *Biosystems engineering*. Vol.105, No.2, 2010, pp.266-72.

[7] Mizrach A. "Ultrasonic technology for quality evaluation of fresh fruit and vegetables in pre-and postharvest processes" *Postharvest biology and technology*. Vol.48, No.3, 2008, pp.315-30.

[8] Butz P, Hofmann C, Tauscher B. "Recent developments in noninvasive techniques for fresh fruit and vegetable internal quality analysis" *Journal of food science*. Vol.70, No.9, 2005.

[۹] گل‌محمدی، رستم : "*مهندسی صدا و ارتعاش*"، چاپ هفتم ویرایش چهارم. انتشارات دانشجو، همدان، ۱۳۸۹، ۵۵۷ ص.

[10] Xiaobo Z, Xiaowei H, Povey M.,"*Non-invasive sensing for food reassurance Analyst*", Vol. 141, No.5, 2016, pp.1587-610.

[11] Muramatsu N, Sakurai N, Yamamoto R, Nevins DJ, Takahara T, Ogata T., "Comparison of a non-destructive acoustic method with an intrusive method for firmness measurement of kiwifruit", *Postharvest Biology and Technology,* Vol.12, No.3, 1997, pp.221-8.

[12] Sun T, Huang K, Xu H, Ying Y., "Research advances in nondestructive determination of internal quality in watermelon/melon: A review", *Journal of Food Engineering*, Vol.100, No.4, 2010, pp.569-77.

[13] Cécile Grémy, G. and M. Emira, "Non-destructive measurements for evaluation of fruit quality", *Researchgate,* 2011.

[14] Cetin AE, Pearson TC, Tewfik AH., "Classification of closed and open shell pistachio nuts using principal component analysis of impact acoustics", *InAcoustics, Speech, and Signal Processing, 2004. Proceedings. (ICASSP'04). IEEE International Conference on* Vol.5, 2004, pp. V-677.

[15] RousseeuwR J; Leroy A M., "*Robust Regression and Outlier Detection*", Wiley, New York, 1987.

[16] Hahn F., "Mango firmness sorter," *Biosystems engineering,* Vol.89, No.3, 2004, pp.309-19.

[۱۷] سعادتی نیا، م؛ عمادی، ب؛ صدر نیا، ح : " ارزیابی رسیدگی هندوانه با استفاده از تحلیل صوت حاصل از اعمال ضربه به آن"، *نشریه ماشین‌های کشاورزی*، ج. ۴، ش. ۲، س.۱۳۹۳ نیمسال دوم، ص.۲۹۶-۳۰۴.

[۱۸] جهانگیری، م؛ حسن بیگی؛ ابونجمی، م؛ خشه‌چی، م : "صدای خرد شدن شاخصی برای تعیین کیفیت میوه خیار"، *اولین کنگره بین‌المللی و بیست و چهارمین کنگره ملی علوم و صنایع غذایی ایران*، تهران، ۲۷-۲۹ مهر ۱۳۹۵، ص.۱- ۸.

[19] Hosainpour A, Komarizade MH, Mahmoudi A, Shayesteh MG.,"High speed detection of potato and clod using an acoustic based intelligent system", *Expert Systems with Applications,* Vol.10, 2011, pp.12101-6.

[20] Zdunek A, Frankevych L, Konstankiewicz K, Ranachowski Z., "Comparison of puncture test, acoustic emission and spatial-temporal speckle correlation technique as methods for apple quality evaluation," *Acta Agrophysica,* Vol.11, No.1, 2008, pp.303-15.

[21] Elbatawi IE., "An acoustic impact method to detect hollow heart of potato tubers," *Biosystems Engineering,* Vol.100, No.2, 2008, pp.206-13.

[22] Demattè ML, Pojer N, Endrizzi I, Corollaro ML, Betta E, Aprea E, Charles M, Biasioli F, Zampini M, Gasperi F., "Effects of the sound of the bite on apple perceived crispness and hardness", *Food Quality and Preference,* Vol.38, 2014, pp.58-64.

[23] Chen J, Karlsson C, Povey M., "Acoustic envelope detector for crispness assessment of biscuits", *Journal of Texture Studies,* Vol.36, No.2, 2005, pp.139-56.

[۲۴] سجادی، جواد : " کاربرد آکوستیک در تشخیص دانه‌های گندم آفت‌زده "، *نشریه علمی ترویجی صوت و ارتعاش*، س. ۵، ش.۱۱، ۱۳۹۶.

[25] Diezma-Iglesias B, Ruiz-Altisent M, Barreiro P., "Detection of internal quality in seedless watermelon by acoustic impulse response", *Biosystems engineering,* Vol.88, No.2, 2004, pp.221-30.

[26] Molina-Delgado D, Alegre S, Barreiro P, Valero C, Ruiz-Altisent M, Recasens I., "Addressing potential sources of variation in several non-destructive techniques for measuring firmness in apples", *Biosystems engineering,* Vol.104, No.1, 2009, pp.33-46.

[27] Feynman, R.P., Leighton, R.B., Sands, M., "The Feynman Lectures on Physics", vol.1, 1963.

[28] Taniwaki M, Sakurai N., "Texture measurement of cabbages using an acoustical vibration method" *Postharvest biology and technology,* Vol.50, No.2, 2008, pp.176-81.

[29] Taniwaki M, Hanada T, Sakurai N., "Postharvest quality evaluation of “Fuyu” and “Taishuu” persimmons using a nondestructive vibrational method and an acoustic vibration technique”, *Postharvest Biology and Technology*, Vol.51, No.1, 2009, pp.80-5.

[30] Taniwaki M, Sakurai N, Kato H., "Texture measurement of potato chips using a novel analysis technique for acoustic vibration measurements", *Food research international*, Vol.43, No.3, 2010, pp.814-8.

[31] Iwatani SI, Akimoto H, Sakurai N., "Acoustic vibration method for food texture evaluation using an accelerometer sensor", *Journal of food engineering*, Vol.115, No.1, 2013, pp.26-32.

[32] Wanitchang P, Terdwongworakul A, Wanitchang J, Nakawajana N., "Non-destructive maturity classification of mango based on physical, mechanical and optical properties," *Journal of Food Engineering,* Vol.105, No.3, 2011, pp.477-84.

[33] Aboonajmi M, Jahangiri M, Hassan-Beygi SR,."A Review on Application of Acoustic Analysis in Quality Evaluation of Agro-food Products," *Journal of food processing and preservation,* Vol.39, No.6, 2015, pp.3175-88.

[۳۴] بیاتی،م؛ رجبی پور،ع؛ مبلی،ح؛ ایوانی، ا : " ارزیابی انبارمانی سیب گلاب با دو روش آکوستیکی و نفوذسنجی". *هشتمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی (بیوسیستم) و مکانیزاسیون ایران* ، ۱۳۹۲.

[35] Amoodeh MT, Khoshtaghaza MH, Minaei S., "Acoustic on-line grain moisture meter", *Computers and Electronics in Agriculture,* Vol.52, No.1, 2006, pp.71-8.

[36] Zdunek A, Cybulska J, Konopacka D, Rutkowski K., "New contact acoustic emission detector for texture evaluation of apples",*Journal of Food Engineering,* Vol.99, No.1, 2010, pp.83-91.

[37] Zdunek A, Cybulska J, Konopacka D, Rutkowski K., "Evaluation of apple texture with contact acoustic emission detector: A study on performance of calibration models", *Journal of Food Engineering*, Vol.106, No.1, 2011, pp.80-7.

[38] Fillion L, Kilcast D., "Consumer Perception of Crispness and Crunchiness in Fruits and Vegetables", *Food Quality and Preference,* Vol.13, 2002, pp.23–29.

[39] Zdunek A., "Application of Acoustic Emission for Quality Evaluation of Fruits and Vegetables", *InAcoustic Emission-Research and Applications InTech.* 2013.

[40] Piazza L, Giovenzana V., "Instrumental acoustic-mechanical measures of crispness in apples", *Food Research International*, Vol.69, 2015, pp.209-15.

[41] Wiktor A, Gondek E, Jakubczyk E, Nowacka M, Dadan M, Fijalkowska A, Witrowa-Rajchert D., "Acoustic emission as a tool to assess the changes induced by pulsed electric field in apple tissue", *Innovative Food Science & Emerging Technologies,* Vol.37, 2016, pp.375-83.

[42] Zdunek A, Frankevych L, Konstankiewicz K, Ranachowski Z., "Comparison of puncture test, acoustic emission and spatial-temporal speckle correlation technique as methods for apple quality evaluation" *Acta Agrophysica,* Vol.11, No.1, 2008, pp.303-15.

[43] Piazza L, Giovenzana V., "Instrumental acoustic-mechanical measures of crispness in apples", *Food Research International,* Vol.69, 2015, pp.209-15.

[44] Valente M, Ferrandis JY., "Evaluation of textural properties of mango tissue by a near-field acoustic method", *Postharvest Biology and Technology,* Vol.29, No.2, 2003, pp.219-28.

[45] Luyten H, Vliet TV., "Acoustic emission, fracture behavior and morphology of dry crispy foods: a discussion article", *Journal of Texture Studies,* Vol.37, No.3, 2006, pp.221-40.

[46] Lotfi M, Darvishi H., "In-line Measurement of Moisture Content of Wheat by Acoustic Method", *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, Vol.8, No.2, 2015, p.163.

[47] Zdunek A, Konopacka D, Jesionkowska K., "Crispness and crunchiness judgment of apples based on contact acoustic emission", *Journal of texture studies,* Vol.41, No.1, 2010, pp.75-91.

[48] Marzec A, Lewicki PP, Ranachowski Z., "Influence of water activity on acoustic emission of flat extruded bread", *Journal of Food Engineering,* Vol.79, No.2, 2007, pp.410-22.

[49] Cybulska J, Pieczywek PM, Zdunek A., "The effect of Ca2+ and cellular structure on apple firmness and acoustic emission" *European Food Research and Technology*, Vol.235, No.1, 2012, pp.119-28.

[50] Akimoto H, Sakurai N, Shirai D., "A new device for acoustic measurement of food texture using free running probe", *Journal of Food Engineering*, Vol.215, 2017, pp.156-60.

[51] Çarşanba E, Duerrschmid K, Schleining G., "Assessment of acoustic-mechanical measurements for crispness of wafer products", *Journal of Food Engineering,* Vol.229, 2018, pp.93-101

[52] Saeleaw M, Schleining G., "A review: Crispness in dry foods and quality measurements based on acoustic–mechanical destructive techniques", *Journal of Food Engineering*, Vol.105, No.3, 2011, pp.387-99.

[53] Chanvrier H, Jakubczyk E, Gondek E, Gumy JC., "Insights into the texture of extruded cereals: Structure and acoustic properties", *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, Vol.24, 2014, pp.61-8.

پی‌نوشت:

1. Acoustic Emision
2. Crispness
3. Microphone Measurement Technique
4. Pulse-echo Ultrasound Technique
5. Pitch and Catch Technique
6. Resonance Techniques
7. Soluble Solids Content
8. Robust Regression and Outlier Detection
9. Pulsed Electric Field (PEF)
10. Perceptron
11. Punch Test
12. Renetta
13. Golden Delicious
14. Fuji
15. Acoustic Envelope Detector (AED)
16. Band Magnitude
17. Advances in Soft Computing
18. Sinclair
19. Texture Index (TI)
20. Fuyu
21. Taishuu
22. Elasticity Index (EI)
23. Laser Doppler Vibrometer (LDV)
24. Energy Texture Index (ETI)
25. Crunchiness
26. Acoustic Emission (AE)
27. Online
28. Sound Pressure Level (SPL)
29. Contact Acoustic Emission Detector (CAED)
30. Fortification
31. Multiple Linear Regression (MLR)
32. Principal Component Regression (PCR)
33. Explorative Multivariate Analysis