

## مقاله پژوهشی

### کیفیت‌سنجی غیرمخرب ارقام مختلف هلو به روش فوتوآکوستیک

طیبه رهنما<sup>۱</sup>، نادر ساکنیان دهکردی<sup>۲\*</sup>، رحیم ابراهیمی<sup>۳</sup>، احسان فروزمهر<sup>۴</sup> و محمد مرادی<sup>۵</sup>

#### چکیده

امروزه سنجش کیفیت و میزان نگهداری میوه‌ها و سبزی‌ها نقش اساسی در کشاورزی مدرن دارد. فوتوآکوستیک روشی نوین در تشخیص غیرمخرب خصوصیات مواد بیولوژیکی است. این مطالعه به سنجش کیفیت سه رقم هلو در طول دوره نگهداری، با استفاده از روش غیرمخرب فوتوآکوستیک در مقایسه با روش مخرب نفوذسنجی پرداخته است. بدین منظور سامانه‌ای برای تولید موج فراصوت پیاده‌سازی شد. بیشینه دامنه سیگنال فوتوآکوستیک و زمان وقوع این دامنه از نمونه‌های آزمایشی استخراج گردید. همچنین با آزمون نفوذسنجی جداگانه، میزان سفتی و ضریب کشسانی بر روی همان نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. با انتخاب فاکتورهای رقم هلو، اندازه و زمان نگهداری، اطلاعات به دست آمده مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که در تمامی منابع، تغییر در شاخص‌های اندازه‌گیری به استثنای فاکتور اندازه در شاخص بیشینه سیگنال بین میانگین‌های شاخص‌ها در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار وجود دارد. با گذشت زمان، شاخص میزان بیشینه دامنه سیگنال کاهش یافت. هرچه اندازه نمونه بیشتر شد، زمان بیشینه دامنه بیشتر افزایش یافته است. بین دو سطح نگهداری تفاوت معنی‌دار وجود داشت. بین فاکتورهای نوع هلو و زمان نگهداری اثر متقابل وجود داشت. نتایج نشان می‌دهد، در اندازه‌های بزرگ‌تر میزان ضریب کشسانی کاهش داشته است. مقایسه میانگین‌های فاکتور نوع هلو در شاخص سفتی نشان داد، در هر سه سطح تفاوت معنی‌دار وجود دارد. بیشترین مقدار در رقم بلخی و کمترین مقدار سفتی به رقم زعفرانی اختصاص داشت. بر اساس نتایج به دست آمده زمان وقوع بیشینه سیگنال، شاخص مناسبی برای بررسی و ارزیابی کیفیت بافت میوه هلو در طول دوره نگهداری آن است. نتایج حاصل از بررسی همبستگی بین پارامترهای دو آزمون نشان داد که بالاترین ضریب همبستگی بین سفتی بافت و بیشینه دامنه سیگنال فوتوآکوستیک برای سه رقم است، به طوری که رقم بلخی دارای بالاترین ضریب همبستگی برابر ۰/۸۲۱ بود. این نتایج، اعتبار روش اندازه‌گیری غیرمخرب و غیرتماسی کیفیت بافت را اثبات می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** سفتی، غیرمخرب، فوتوآکوستیک، لیزر- فراصوت، کیفیت بافت.

**ارجاع:** رهنما ط. ساکنیان دهکردی ن. ابراهیمی ر. فروزمهر ا. و مرادی م. ۱۴۰۰. کیفیت‌سنجی غیرمخرب ارقام مختلف هلو به روش فوتوآکوستیک. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۱۹: ۷۵-۸۹.

1- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.  
2- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.  
3- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.  
4- دانشیار گروه ساخت و تولید، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان.  
5- استادیار گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شهرکرد.

\*نویسنده مسئول: [sakenian@sku.ac.ir](mailto:sakenian@sku.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۷

## مقدمه

بررسی خواص فیزیکی و آگاهی از ویژگی‌های بافت میوه ها و برخی سبزیجات به روش های غیرمخرب برای برآورد کیفیت اینگونه محصولات بین متخصصین و دانش پژوهان از جایگاه خاصی برخوردار است. اگر چه کیفیت میوه‌ها و سبزی‌ها توسط ویژگی‌هایی همچون ظاهر، طعم و مواد غذایی آن بیان می‌گردد، ولی بافت مهم‌ترین ویژگی، برای بیان کیفیت آن‌ها است (Chen & Opera, 2013). تکنیک‌های ابزاری و حسی به طور گسترده‌ای در ارزیابی بافت استفاده شده است. تعریف بافت به شکل حسی، به دلیل آنکه از یک بیان پیچیده از حواس لمسی، بینایی، شنوایی و کنیستزی (احساس حرکت اندام) ناشی می‌شود، به صورت دقیق بسیار مشکل است (Waldron *et al.*, 2003). مصرف‌کنندگان از مفاهیم توصیفی چون تردی، خردی، خمیری و آبداری برای بیان ویژگی‌های بافتی استفاده می‌کنند که بسیار ذهنی است (Terefe & Versteeg, 2011). تکنیک‌های حسی، ارزیابی بافت به صورت غیر خطی است و تحت تأثیر عوامل مختلفی از قبیل خستگی ارزیاب (Peleg, 2006)، سطح و نوع آموزش دریافت شده توسط شرکت کنندگان (Bárcenas, *et al.*, 2007)، خواص رئولوژیکی بافت (Peleg, 2006) و سایر ویژگی‌های اساسی مانند طعم و مزه (Van Vilet *et al.*, 2009) قرار می‌گیرد و در مقایسه با ارزیابی ابزاری وقت‌گیر و گران است (Kim *et al.*, 2012).

تکنیک‌های اندازه‌گیری ابزاری به طور اساسی روی ارزیابی خواص مکانیکی وابسته است، مواد غذایی شامل میوه‌ها و سبزی‌ها تحت تأثیر بارگذاری، رفتار ویسکوالاستیک از خود نشان می‌دهند و در پاسخ به نیرو دچار تغییر شکل می‌شوند، بنابراین میزان نیروی مورد نیاز برای ایجاد یک میزان مشخص از تغییر شکل می‌تواند برای ارزیابی کمی بافت استفاده شود (Lu & Tipper, 2009). سفتی بافت یک پارامتر ابزاری مهم برای بیان تغییرات و ویژگی‌های بافتی میوه‌ها و سبزی‌ها است. به طور سنتی سفتی، توسط روش مخرب و با حداکثر نیروی لازم برای نفوذ یک پروب سیلندری به درون بافت میوه‌ها و سبزی‌ها تعریف می‌شود (Chen & Opara, 2013). جذب و پراکنندگی طیف نور در درون بافت برای اندازه‌گیری غیرمخرب و غیرتماسی ویژگی‌های بافتی میوه‌ها و سبزی‌ها استفاده شده است (Lu & Chen *et al.*, 2013)، اما روش دقیقی نیست (Lu &

(Huang & Peng, 2006) و نیاز به محاسبات پیچیده دارد (Lu, 2010).

همچنین ابزارهای گوناگون و تکنیک‌های اندازه‌گیری بر اساس امواج فراصوت برای نشان دادن تغییرات مکانیکی بافت که در طول دوره رسیدگی محصولات اتفاق می‌افتد، فراهم شده است و رابطه خوبی بین پارامترهای امواج فراصوت و میزان سفتی محصولات در طول دوره رسیدگی، گزارش شده است، اما روشی تماسی نیاز به طراحی پروب خاص برحسب نوع محصول دارد، لذا استفاده از روش‌های ترکیبی که بتوان از مزایای هر دو روش استفاده کرد مورد نظر محققان بوده است. یکی از این روش‌های ترکیبی، اثر فوتوآکوستیک<sup>۱</sup> است. استفاده از اثر فوتوآکوستیک که اپتوآکوستیک<sup>۲</sup> یا لیزر-فراصوت نیز نامیده می‌شود، یکی از زمینه‌های پژوهشی جالب در تست‌های غیرمخرب مواد و یا تشخیص غیرتهاجمی بافت زنده در پزشکی است (Wang, 2002).

پالس نور لیزر با انرژی بالا، توسط نمونه، جذب شده و یک منقطه متمرکز از دمای افزایش یافته را می‌آفریند و بنابراین حجم افزایش می‌یابد (انبساط ترموالاستیک) و موج‌های فراصوت تولید می‌کند. شکل و طیف از امواج فراصوت تولید شده توسط پالس نور در مواد نه تنها به پارامترهای پالس نوری شامل شکل و طول پالس و شعاع پرتو و زمان خیز بستگی دارد، بلکه به خواص نوری مانند نفوذ نوری، انتشار گرمایی و ضریب جذب و خواص هندسی و مکانیکی ماده جاذب بستگی دارد (Tam, 1986). در یک مطالعه از منبع نور لیزر برای تولید و تشخیص موج فراصوت برای تعیین خواص الاستیک سیب در طول دوره رسیدگی آن استفاده شد. نتایج نشان داد که امواج تولید شده در طول دوره رسیدگی همزمان با کاهش خواص الاستیکی ضعیف می‌شوند (Hitchman *et al.*, 2016).

کشور ایران با تولید سالانه ۶۵۰ هزار تن (FAO, 2018) از ارقام مختلف میوه هلو نقش مهمی در تولید این محصول دارد، اما فساد پذیری زیاد و عمر کوتاه پس از برداشت آن از عوامل محدود کننده برای بازاریابی آن است. به دلیل نرمی سریع آن در حین فرآیند رسیدن، یک مرحله زودتر از رسیدن برداشت می‌شود تا هنگامی که به دست مشتری می‌رسد دارای کیفیت رضایت‌بخش باشد.

1- Photoacoustic

2- Optoacoustic

تحت آزمایش فوتوآکوستیک و بلافاصله تحت آزمایش نفوذسنجی قرار گرفتند. به دلیل آنکه، هلو یکی از میوه‌هایی است که فسادپذیری بالا دارد و لذا مدت زمان نگهداری آن پس از برداشت کوتاه بوده و به طور متوسط نگهداری آن تا دو هفته امکانپذیر است، قسمت دوم نمونه‌ها پس از ۱۰ روز تحت آزمایش قرار گرفتند.

### اصول آزمایش فوتوآکوستیک

قبل از توضیح چگونگی انجام آزمایش، توضیحات مختصری راجع به اصول آزمایش فوتوآکوستیک ضروری به نظر می‌رسد. جذب انرژی پالسی لیزر با طول پالس نانو ثانیه و در طول موج NIR، در ماده بیولوژیک منجر به ایجاد انبساط ترموالاستیک می‌شود و در نتیجه این انبساط، یک فشار اولیه متغیر با زمان ایجاد می‌گردد که در نتیجه آن یک موج فشاری قابل ملاحظه ای در محیط منتشر می‌شود که نحوه انتشار این موج تنشی توسط معادله موج صوتی توصیف می‌شود (Manohar & Dantuma, 2019).

این امواج دارای فرکانسی در حوزه فراصوت هستند (Wang & Wu, 2012). معادله فشار اولیه تولید شده تحت انبساط گرمایی مطابق با معادله (۱) برابر است با:

$$p_0 = p(r, t = 0) = \Gamma H(r) = \frac{\beta v_s^2}{C_p} H(r) \quad (1)$$

عبارت  $\Gamma$  پارامتر گرانزین بافت،  $\beta$  ضریب انبساط حجمی ماده جاذب و  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه و  $v_s$  سرعت موج صوتی در درون ماده است (Manohar & Dantuma, 2019).

عبارت  $H(r)$  انرژی پالس لیزر جذب شده که بر حسب شار نوری جذب شده  $\Phi(r)$  و ضریب جذب ماده  $\mu_a$  بر اساس معادله (۲) به دست می‌آید (Zhou *at al.*, 2016) و (Manohar & Dantuma, 2019)

$$H(r) = \Phi(r)\mu_a(r) \quad (2)$$

سرعت موج صوتی در ماده بر اساس معادله (۳) تابعی از خواص مکانیکی ماده  $\mu$ ،  $E$  و چگالی ماده  $\rho$  است (Kinsler *at al.*, 2002)

$$v_s = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (3)$$

از سوی دیگر، برای انتشار امواج صوتی باید تنش گرمایی ایجاد شده توسط تابش پالس لیزر، به بیشینه مقدار خود برسد. مقیاس زمانی لازم برای این بیشینه شدن، زمان استراحت صوتی  $t_{ac}$  است. که بر اساس معادله (۴) به دست می‌آید (Paltauf & Dyer, 2003).

بنابراین ارزیابی از میزان رسیدگی آن و بررسی مطلوب بودن کیفیت آن در طول فرآیند پس از برداشت برای ارقام مختلف آن مهم است. لذا هدف از انجام تحقیق حاضر بررسی میزان رسیدگی ارقام هلو با استفاده از روش مخرب نفوذ و روش غیرمخرب فوتوآکوستیک بود. تغییرات بیشینه دامنه سیگنال و زمان وقوع بیشینه دامنه به عنوان پارامترهای فوتوآکوستیک بررسی شد.

### مواد و روش‌ها

#### اندازه‌گیری رطوبت و چگالی

سه رقم هلو شامل زعفرانی از نوع دیررس، کاردی و بلخی از یک باغ واقع در شهر سامان در شمال شرقی استان چهار محال و بختیاری تهیه گردید. به منظور جلوگیری از وارد آمدن حداقل صدمه به محصول، برداشت به صورت دستی انجام شد و به دقت در جعبه‌های پلاستیکی یک ردیفه جهت حمل قرار داده شد. رقم‌ها به میزان مورد نیاز با اندازه‌گیری بر اساس قطر هندسی ۶۱ تا ۷۰ میلی‌متر و به اختلاف یک میلی‌متر انتخاب گردید.

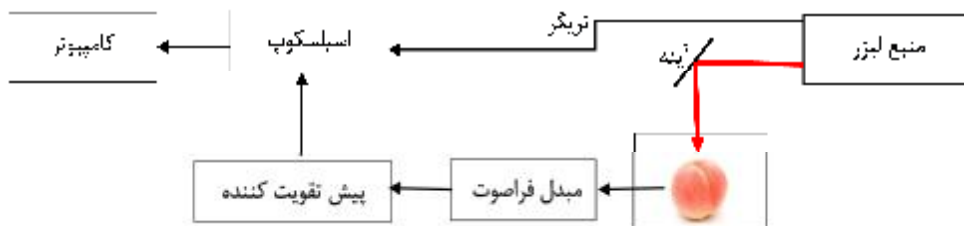
به منظور اندازه‌گیری چگالی متوسط نمونه‌های مورد آزمایش، چند نمونه مشابه نمونه‌های اصلی به صورت تصادفی انتخاب گردید سپس جرم هر کدام با استفاده از ترازوی دیجیتال (AND-PS) با دقت یک گرم اندازه‌گیری شد. حجم نمونه‌ها نیز با استفاده از روش ارشمیدس اندازه‌گیری شد. ظرف حاوی آب خالص بر روی ترازو قرار گرفته و ترازو قرائت شد و میوه در درون آن به گونه ای قرار گرفت تا کاملاً در آب معلق شود و سپس ترازو قرائت گردید. حجم میوه با اختلاف وزن میوه غوطه‌ور در آب خالص و وزن آب خالص، تقسیم بر چگالی آب خالص ( $\text{kg/m}^3$ ) به دست آمد و با تقسیم وزن هر نمونه به حجم آن، چگالی محاسبه شد (Mohsenin, 1978). به منظور اندازه‌گیری رطوبت متوسط، چند نمونه مشابه نمونه‌های اصلی را به صورت تصادفی انتخاب و پس از وزن کردن در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفته و سپس وزن شدند و بر اساس اختلاف وزن قبل از قرار دادن در آون و بعد از خشک شدن در آون تقسیم بر وزن اولیه، درصد رطوبت متوسط محاسبه گردید.

نمونه‌های اصلی انتخاب شده به دو قسمت مساوی شامل هر سه رقم تقسیم شد؛ نمونه‌های قسمت اول از هر رقم بر اساس الگوی طرح آزمایشی یک روز بعد از برداشت،

سازوکار سیگنال فوتوآکوستیک تولید شده ناشی از تابش لیزر بر سطح میوه‌ی هلو نیز تغییر می‌کند.

### سامانه فوتوآکوستیک

سامانه کیفیت‌سنجی فوتوآکوستیک طراحی شده برای این تحقیق مطابق شکل ۱، شامل منبع لیزری، دریافت کننده سیگنال، پیش تقویت کننده، نوسان نما و رایانه است.



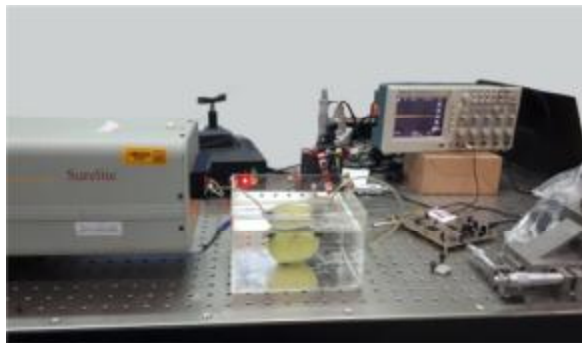
شکل ۱- طرحواره سامانه تولید و دریافت موج فوتوآکوستیک

۱۰ هرتز و قطر لیزری ۵ میلی‌متر استفاده شد. (Hitchman *et al.*, 2016).

شکل ۲، انجام آزمایش نمونه‌ها را در موقعیت ایزوله نشان می‌دهد.

مسئله مهم در استفاده از منبع لیزر برای تولید موج صوتی، انرژی هر پالس لیزر است که به راحتی می‌تواند جسم را در آستانه فرسایش و آسیب حرارتی قرار دهد (Culshaw *et al.*, 2008).

عامل مهم برای تولید سیگنال فوتوآکوستیک جذب کامل انرژی نوری است؛ قبل از آنکه گرمای ناحیه گرم شده به سایر قسمت‌ها هدایت شود و یا تحت تنش گرمایی ایجاد شده، امواج فشاری تولید شود. استفاده از لیزر با انرژی بالا و عرض پالس کوتاه در حد چند نانو ثانیه انجام این مهم را امکان‌پذیر می‌سازد (Nikitchev *et al.*, 2016). برای تولید سیگنال فوتوآکوستیک بر روی میوه هلو، از منبع لیزر (Continum Surelite Nd:YAG) با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر و عرض پالس ۱۰ نانوثانیه، نرخ تکرار پالس



شکل ۲- موقعیت نمونه هنگام آزمایش

گیرنده‌های پیزوالکتریک به دلیل حساسیت بالای آنها برای دریافت سیگنال استفاده گردید. برای تشخیص و دریافت سیگنال از مبدل گیرنده فراصوت با فرکانس مرکزی ۱MHz ساخت شرکت XINHAITAI استفاده شد. به دلیل غیرتماسی بودن آزمایش‌ها مبدل در فاصله ۰/۲۵ mm از محصول قرار گرفت و به منظور تقویت سیگنال

بنابراین با انتخاب توان مناسب، علاوه بر تولید موج، انرژی موج حاصل، مانع از آسیب رسیدن به نمونه می‌شود که در این پژوهش، انتخاب توان پالس ۸۵ mJ دستیابی به هدف مورد نظر را میسر ساخت. سیگنال تولید شده در اثر تابش پالس لیزر بر روی محصول در محدوده فرکانسی فراصوت است؛ بنابراین از

انجام گرفت.

با توجه به تأثیر مدول کشسانی بافت نمونه جاذب بر سرعت صوت (معادله (۴)) و متعاقباً بر سازوکار سیگنال فوتوآکوستیک تولید شده، مدول کشسانی ارقام هلو در طول دوره رسیدگی با استفاده از روابط زیر و با آزمون نفوذ محاسبه گردید. مدول کشسانی میوه‌ها بر اساس معادله (۵) تابع میزان سفتی بافت است (Mohsenin, 1984).

$$E = \frac{F}{D} \left( \frac{1 - \mu^2}{2r} \right) \quad (5)$$

در معادله فوق، F سفتی بافت (N)، r شعاع پروب اندازه‌گیری سفتی (mm)، D جابجایی پروب (mm) در سفتی، E مدول کشسانی (MPa) و  $\mu$  نسبت پواسون است. ضریب پواسون میوه هلو بر اساس داده‌های ASAE، ۰/۴۹ در نظر گرفته شد (ASAE, 2008).

### روش آماری و نحوه آزمایش

پس از آماده‌سازی سامانه‌های آزمایش، سیگنال فوتوآکوستیک تولید شده ناشی از تابش لیزر بر سطح محصول هلو از سامانه استخراج و جهت به دست آوردن داده‌های شاخص‌های مورد نظر به کامپیوتر انتقال داده شد. بدین منظور بر اساس طرح آزمایشی، بیشینه دامنه سیگنال و زمان وقوع آن به عنوان شاخص‌های به دست آمده از سیگنال فوتوآکوستیک، با استفاده از نرم‌افزار متلب (MATLAB, 2016) استخراج شد. شکل ۴، به طور نمونه سیگنال فوتوآکوستیک تولید شده ناشی از تابش لیزر بر سطح محصول هلو را در حوزه زمان نشان می‌دهد.

خروجی از مبدل، یک پیش تقویت کننده با بهره متغیر (عرض باند ۲۰ KHz تا ۲ MHz مگاهرتز و ضریب تقویت ۴۰ و Decibel ۶۰ به کار گرفته شد).

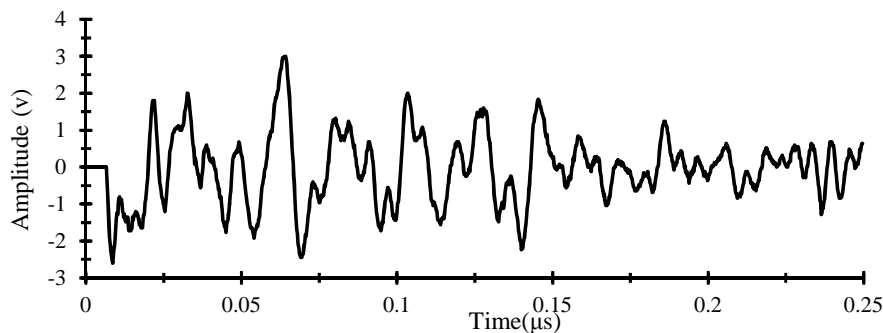
سیگنال‌های حاصل توسط نوسان‌نمای ۲۰۰ MHz (Tektronix, TDS2024B) ثبت گردید.

آزمایش فوتوآکوستیک در ۵ تکرار بر قسمت‌های مختلف میوه و با تابش ۵ پالس لیزر در هر تکرار انجام شد. به منظور بررسی ساز و کار سیگنال و استخراج بیشینه دامنه آن (پیک سیگنال) و زمان وقوع آن، سیگنال‌ها به رایانه منتقل، پردازش و تحلیل و سپس استخراج داده‌ها صورت گرفت.

### خواص مکانیکی بافت

خواص مکانیکی بافت میوه توسط آزمون نفوذ مگنس تیلور و با استفاده از دستگاه آنالیز بافت (CT3<sup>TM</sup>) Texture ANALYZER BROOKFIELD AMETEK انجام شد. سرعت انجام بارگذاری ۰/۵ mm/s تنظیم گردید. بارگذاری با لودسل ۴۵۰۰ گرمی توسط پروب ۶ و تا عمق ۸mm انجام شد (Ma et al., 2020). آزمایش نفوذ بر روی نمونه‌ها و در قسمت‌های مختلف که تحت تابش لیزر قرار گرفته بودند، انجام شد.

نمودارهای نیرو- زمان و نیرو- تغییر شکل، توسط نرم‌افزار دستگاه (TexturePro CT Software) ترسیم گردید و حداکثر نیروی لازم برای نفوذ پروب به داخل بافت به عنوان میزان سفتی بر روی نمونه‌هایی که قبلاً تحت آزمون‌های تشخیص ویژگی‌های فیزیکی مانند وزن و ابعاد نمونه و چگالی و تست فوتوآکوستیک قرار گرفته بودند،



شکل ۴- یک نمونه سیگنال فوتوآکوستیک تولید شده ناشی از تابش لیزر بر روی میوه هلو

و اندازه هلو برداشت شده در ۱۰ سطح (اندازه) و در ۵ تکرار مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. بنابراین، فاکتور نوع محصول هلو در ۳ واریته شامل زعفرانی،

داده‌های به دست آمده، با یک آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با فاکتورهای نوع محصول هلو در ۳ سطح (نوع)، زمان نگهداری محصول در ۲ سطح (زمان)

آزمون با بررسی ضرایب همبستگی نیز مورد مقایسه قرار گرفتند. آزمون‌ها در سطح احتمال ( $p < 0.05$ ) توسط نرم‌افزار SPSS.23 انجام شد.

### نتایج

با بررسی مقادیر اندازه‌گیری شده خصوصیات فیزیکی مورد نظر و مقادیر شاخص‌های نمونه‌های مورد آزمایش، درصد تغییرات خواص مختلف ارقام هلو در طول دوره نگهداری (از زمان برداشت تا ۱۰ روز پس از آن) مطابق جدول ۱ به دست آمد.

کاردی و بلخی، فاکتور زمان نگهداری محصول در ۲ زمان یکی بلافاصله پس از برداشت (نوبت اول) و دیگری ۱۰ روز پس از برداشت (نوبت دوم) و فاکتور اندازه میوه‌های هلو در ۱۰ سطح، شامل میوه‌های با قطرهای متوسط ۶۱ تا ۷۰ میلی‌متر و به فاصله یک میلی‌متر، در ۵ تکرار مورد آزمون قرار گرفتند.

نتایج حاصل از تست نفوذ به طور مشابه با اندازه‌گیری سفتی و ضریب کشسانی (مدول الاستیسیته) در همان قالب طرح آزمایشی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن صورت گرفت. سرانجام میانگین‌های دو دسته از داده‌های به دست آمده از دو

جدول ۱- درصد تغییرات خواص ارقام هلو در طول دوره نگهداری

نوع هلو	محتوای رطوبتی	چگالی	سفتی	مدول کشسانی	بیشینه دامنه سیگنال	زمان وقوع بیشینه دامنه سیگنال
زعفرانی	-۱/۶۵	+۱/۵۱	-۷۲/۶۸	-۵۴/۶۷	-۱۰/۳۵	+۵۴/۰۷
کاردی	-۳/۰۳۶	+۰/۵	-۷۵	-۵۴/۸۵	-۱۴/۹۵	+۷۱/۸۵
بلخی	+۰/۲	+۰/۷۶	-۷۸/۶۷	-۶۷/۹۱	-۲۴/۸۷	+۲۷/۵۸

- کاهش + افزایش

بین دو تا از میانگین‌های شاخص‌ها اختلاف معنی‌دار وجود دارد. نتایج حاکی از تکرار دقت نسبتاً مطلوبی را در آزمایش‌های انجام شده نوید می‌دهد.

جدول ۳، نتایج مقایسه میانگین‌های فاکتور نوع هلو در شاخص بیشینه دامنه سیگنال را در متغیر بیشینه دامنه سیگنال در سطح ۵٪ نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود بین سه رقم هلو در شاخص بیشینه دامنه سیگنال در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار وجود دارد. بیشترین مقدار در نوع بلخی و کمترین در نوع زعفرانی مشاهده شد.

نتایج مقایسه میانگین‌های فاکتور اندازه قطر متوسط هلو در شاخص بیشینه دامنه سیگنال را در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. به عبارت دیگر اندازه هلوها نقشی در شاخص یاد شده ندارند.

شکل ۵ مقایسه میانگین‌های اثر اصلی فاکتور زمان نگهداری در شاخص بیشینه دامنه سیگنال را دونوبت مختلف اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود میزان بیشینه دامنه سیگنال در نوبت اول بیشتر از نوبت دوم یعنی پس از ۱۰ روز است؛ این بدان معناست که با گذشت زمان دامنه سیگنال کاهش می‌یابد.

همان‌گونه که در جدول ۱، مشاهده می‌گردد در مدت نگهداری یعنی فاصله دو اندازه‌گیری شاخص‌های مورد آزمایش، محتوای رطوبتی ارقام زعفرانی و کاردی کاهش و محتوای رطوبتی رقم بلخی افزایش بسیار جزئی یافت. همچنین چگالی محصول و زمان وقوع بیشینه دامنه از سیگنال فوتوآکوستیک برای همه ارقام هلو افزایش یافت، به‌طوری‌که رقم کاردی بیشترین افزایش (۷۵/۸۵٪) را برای زمان وقوع پیک سیگنال داشت. سفتی بافت و ضریب کشسانی و بیشینه دامنه سیگنال فوتوآکوستیک برای همه ارقام کاهش یافت که رقم بلخی برای همه پارامترهای ذکر شده بیشترین درصد کاهش را در طول دوره نگهداری داشت.

جدول ۲، نتایج تجزیه واریانس بر ارائه میانگین مربعات اثرهای اصلی و اثرات متقابل فاکتورهای آزمایش متغیرهای مستقل شامل رقم هلو، زمان نگهداری محصول و اندازه هلو را در شاخص‌های سفتی (برحسب نیوتن) و ضریب کشسانی (برحسب مگاپاسکال) و بیشینه دامنه سیگنال فوتوآکوستیک (برحسب ولت) و زمان وقوع بیشینه دامنه (برحسب میکروثانیه) را نشان می‌دهد.

نتایج نشان داد که در تمامی شاخص‌های اندازه‌گیری به استثنای فاکتور اندازه در شاخص بیشینه سیگنال حداقل

جدول ۲- میانگین مربعات حاصل از تجزیه واریانس متغیرهای اندازه‌گیری شده

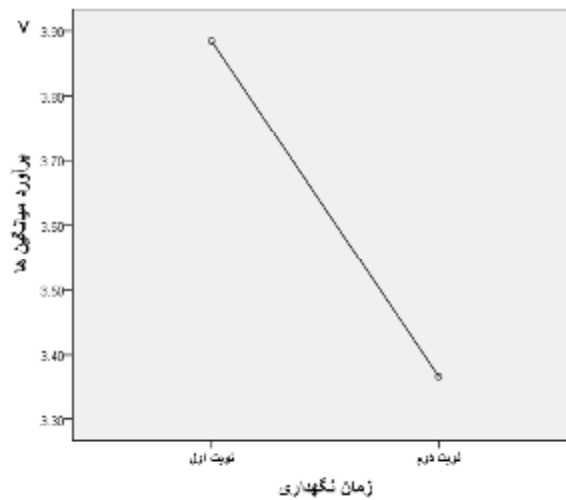
منابع تغییر	درجه آزادی	زمان بیشینه دامنه	بیشینه دامنه سیگنال	ضریب کشسانی	سفتی
تکرار	۴	۰/۰۰	۱/۱۸۳*	۰/۰۱۷	۳/۷۱۴
نوع	۲	۱/۰۴۴*	۲۹/۴۷۶*	۸/۲۲۲*	۴۳۸۸/۵۲۴*
زمان	۱	۱/۲۲۲*	۱۸/۸۶۱*	۲۳/۶۹۲*	۱۷۱۰۷/۱۵۵*
اندازه	۹	۰/۰۲۸*	۰/۲۱۸	۰/۴۳۹*	۱۴۸/۳۷۶*
نوع × زمان	۲	۰/۳۳۸*	۱/۱۵۰*	۳/۲۹۴*	۱۸۵۲/۴۵۸*
نوع × اندازه	۱۸	۰/۰۲۸*	۰/۳۱۶	۰/۲۴۶*	۵۴/۷۰۳*
زمان × اندازه	۹	۰/۰۲۱*	۰/۶۲۵*	۰/۲۸۵*	۸۰/۲۶۴*
نوع × زمان × اندازه	۱۸	۰/۰۱۷*	۰/۱۶۹	۰/۲۷۵*	۴۷/۷۰۸*
خطا	۲۲۵	۰/۰۰	۰/۳۲۴	۰/۰۲۲	۴/۷۰۹

\* معنی‌دار در سطح ۵٪

جدول ۳- مقایسه میانگین‌های بیشینه دامنه سیگنال در متغیر نوع هلو با آزمون دانکن

نوع هلو	زیر مجموعه		
	۱	۲	۳
زعفرانی	۳/۱۵۳۹		
کاردی		۳/۴۷۰۸	
بلخی			۴/۲۵۱۸

در سطح ۵٪



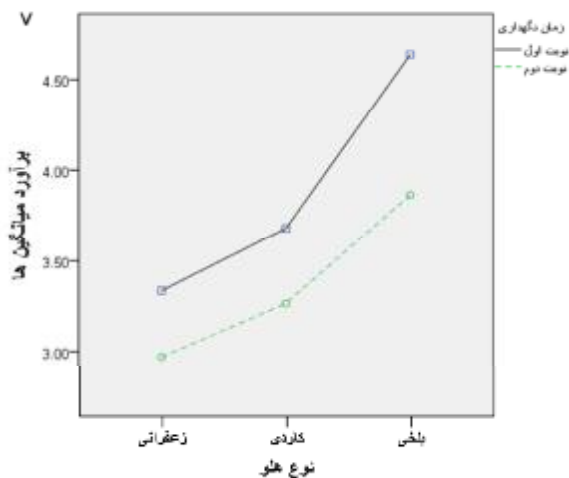
شکل ۵- اثر اصلی فاکتور زمان نگهداری در شاخص بیشینه دامنه سیگنال

کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین هلو را در شاخص بیشینه دامنه سیگنال نشان می‌دهند.

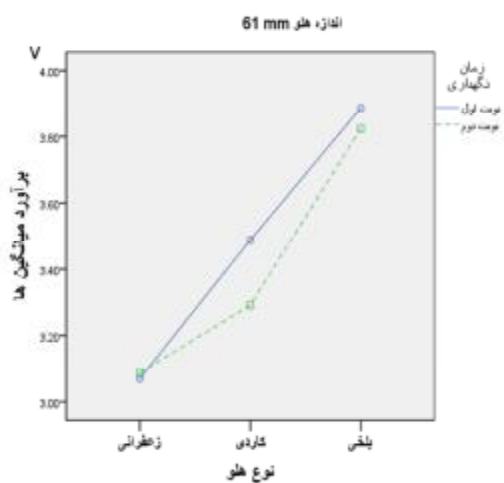
نتایج جدول ۴، نشان می‌دهد که در شاخص زمان بیشینه دامنه بین رقم بلخی با دو رقم دیگر اختلاف معنی‌دار وجود دارد، ولی بین زعفرانی و کاردی اختلاف معنی‌دار وجود ندارد.

اثر متقابل فاکتورهای نوع هلو و زمان نگهداری در شکل ۶، در شاخص بیشینه دامنه سیگنال نشان داده شده است. اثر متقابل در دو فاکتور وجود دارد ولی چندان قابل توجه نیست.

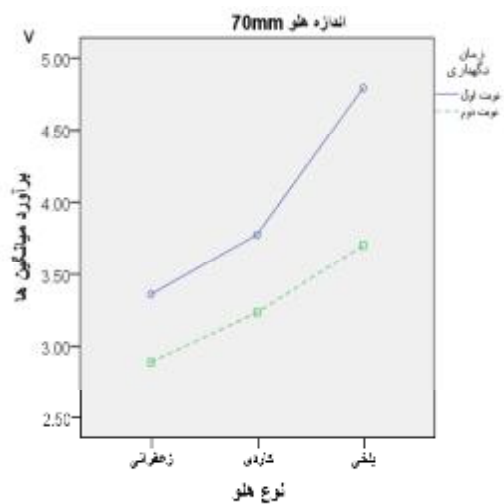
شکل‌های ۷ و ۸ اثر متقابل فاکتورهای آزمایش یعنی فاکتور نوع هلو × مدت نگهداری به تفکیک در دو اندازه



شکل ۶- اثر متقابل فاکتورهای زمان نگهداری × نوع هلو در شاخص بیشینه دامنه سیگنال



شکل ۷- اثر متقابل فاکتورهای زمان نگهداری × نوع هلو در کوچک‌ترین اندازه (61 mm) در شاخص بیشینه دامنه سیگنال



شکل ۸- اثر متقابل فاکتورهای زمان نگهداری × نوع هلو در بزرگ‌ترین اندازه (70 mm) در شاخص بیشینه دامنه سیگنال



جدول ۴- مقایسه میانگین‌های زمان بیشینه دامنه در متغیر نوع هلو با آزمون دانکن

زیر مجموعه		نوع هلو
۲	۱	
	۰/۰۲۶۴	زعفرانی
۰/۲۱۳۳		کاردی
۰/۲۱۴۷		بلخی

در سطح ۵%

جدول ۵، نتایج مقایسه میانگین‌های فاکتور اندازه قطر متوسط هلو در شاخص زمان بیشینه دامنه را در سطح ۵% نشان می‌دهد. نتایج حاصل از جدول ۵، نشان می‌دهد در برخی اندازه‌ها در شاخص زمان وقوع بیشینه دامنه

سیگنال اختلاف معنی‌دار وجود دارد. روند افزایش اندازه با افزایش زمان در یک جهت است. هرچه اندازه بیشتر شده است زمان وقوع بیشینه دامنه سیگنال نیز افزایش داشته است.

جدول ۵- مقایسه میانگین‌های زمان بیشینه دامنه در متغیر اندازه قطر متوسط هلو با آزمون دانکن

زیرمجموعه								اندازه هلو (mm)
۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
							۰/۱۰۸۹	۶۱
						۰/۱۲۷۳		۶۳
						۰/۱۲۹۷		۶۴
					۰/۱۴۲۲			۶۲
				۰/۱۵۰۳	۰/۱۵۰۳			۶۵
			۰/۱۵۳۳	۰/۱۵۰۳				۶۶
		۰/۱۶۱۷	۰/۱۶۱۷					۶۸
		۰/۱۶۳۱						۶۷
	۰/۱۷۷۸							۶۹
۰/۲۳۶۴								۷۰

در سطح ۵%

نگهداری اثر متقابل وجود دارد. بر اساس طرح موزی انجام شده، جدول ۶، نتایج مقایسه میانگین‌های فاکتور نوع هلو در شاخص ضریب کشسانی را در سطح ۵% نشان می‌دهد.

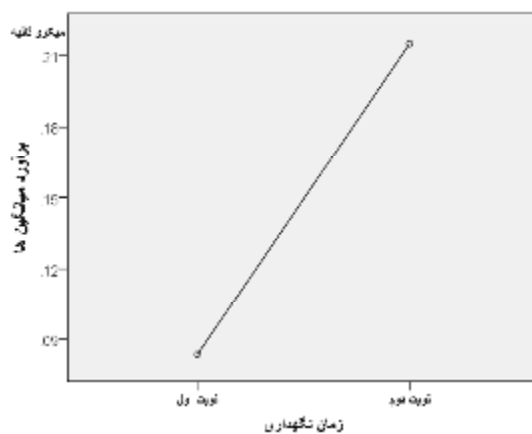
بر اساس نتایج جدول ۶، بین هر سه رقم هلو در شاخص ضریب کشسانی اختلاف معنی‌دار وجود دارد، به عبارت دیگر میزان ضریب کشسانی که به جنس بافت بستگی دارد در هر سه رقم هلو متفاوت است.

نتایج مقایسه میانگین‌های فاکتور اندازه هلو در شاخص ضریب کشسانی در سطح ۵% مطابق جدول ۷ به دست آمد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بین میانگین‌های اندازه اختلاف معنی‌دار وجود دارد، ولی به طور تقریبی می‌توان گفت در بیشتر مقادیر در اندازه‌های بزرگ‌تر میزان ضریب کشسانی کاهش داشته است. بیشترین و کمترین مقدار به ترتیب در اندازه ۶۲ و ۷۰ میلی‌متر مشاهده می‌شود.

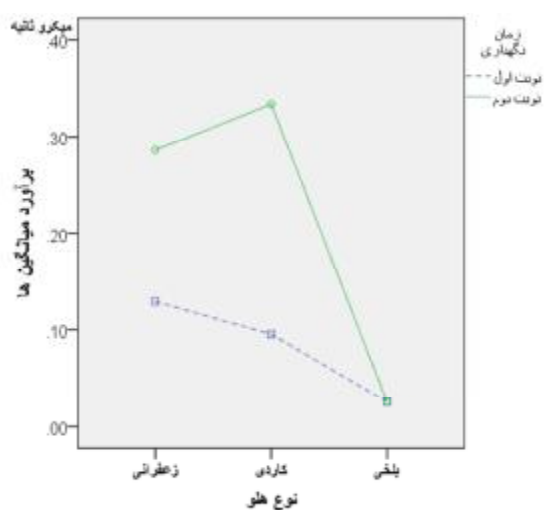
شکل ۹ مقایسه میانگین‌های اثر اصلی فاکتور زمان نگهداری در شاخص زمان بیشینه دامنه را دونوبت مختلف اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. بین دو نوبت تفاوت معنی‌دار وجود دارد و در نوبت دوم میزان زمان وقوع بیشینه دامنه سیگنال افزایش داشته است.

اثر متقابل فاکتورهای نوع هلو و زمان نگهداری در شکل ۱۰، در شاخص زمان بیشینه دامنه نشان داده شده است. نمودار نشان می‌دهد بین دو فاکتور اثر متقابل وجود دارد. به عبارت دیگر با تغییر رقم روند تغییرات زمان نگهداری یکسان نیست.

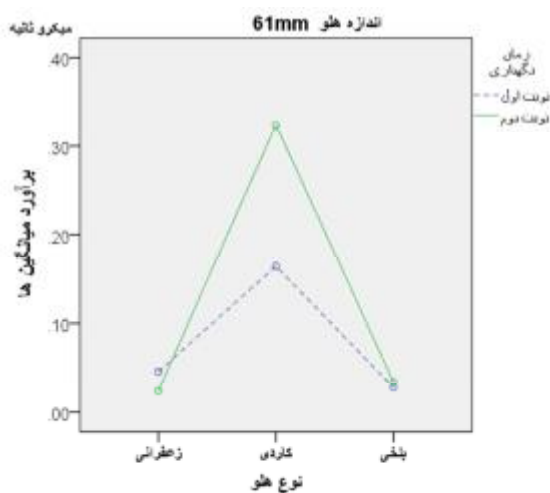
شکل‌های ۱۱ و ۱۲ اثر متقابل فاکتورهای آزمایش یعنی فاکتور نوع هلو × مدت نگهداری به تفکیک در دو اندازه کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین هلو را در شاخص زمان بیشینه دامنه نشان می‌دهند. در هر دو اندازه هلو با قطرهای ۶۱ میلی‌متر و ۷۰ میلی‌متر بین دو فاکتور رقم و زمان



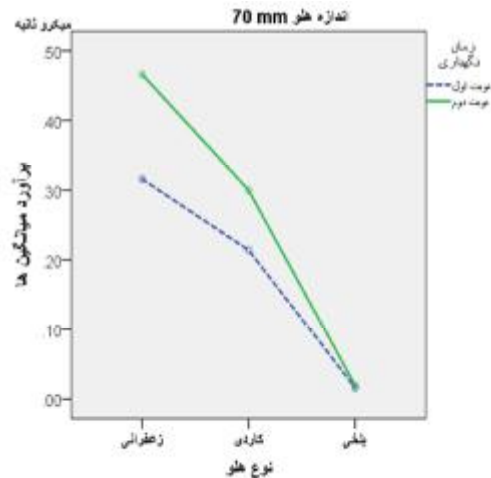
شکل ۹- اثر اصلی فاکتور زمان نگهداری در شاخص زمان بیشینه دامنه



شکل ۱۰- اثر متقابل فاکتورهای زمان نگهداری × نوع هلو در شاخص زمان بیشینه دامنه



شکل ۱۱- اثر متقابل فاکتورهای زمان نگهداری × نوع هلو در کوچک ترین اندازه (61 mm) در شاخص زمان بیشینه دامنه



شکل ۱۲- اثر متقابل فاکتورهای زمان نگهداری × نوع هلو در بزرگ‌ترین اندازه (70 mm) در شاخص زمان بیشینه دامنه

جدول ۶- مقایسه میانگین‌های ضریب کشسانی در متغیر نوع هلو با آزمون دانکن (MPa)

نوع هلو	زیر مجموعه		
	۱	۲	۳
زعفرانی	۰/۵۲۸۷		
کاردی		۰/۶۸۳۰	
بلخی			۱/۲۳۳۰

در سطح ۵%

جدول ۷- مقایسه میانگین‌های ضریب کشسانی در متغیر اندازه هلو با آزمون دانکن (Mpa)

اندازه هلو (mm)	زیر مجموعه		
	۱	۲	۳
۷۰	۰/۷۰۰۶		
۶۸	۰/۷۱۵۴	۰/۷۱۵۴	
۶۵	۰/۷۲۵۲	۰/۷۲۵۲	
۶۶	۰/۷۳۱۲	۰/۷۳۱۲	
۶۹	۰/۷۳۴۸	۰/۷۳۴۸	
۶۱	۰/۷۵۹۷	۰/۷۵۹۷	
۶۷	۰/۷۷۰۹	۰/۷۷۰۹	
۶۴		۰/۸۱۹۴	
۶۳			۱/۰۱۷۲
۶۲			۱/۱۷۴۳

در سطح ۵%

همچنین نتایج مقایسه میانگین‌های فاکتور اندازه هلو در شاخص سفتی در سطح ۵% مطابق جدول ۹ به دست آمد. بین میانگین‌ها تفاوت معنی‌داری مشاهده می‌شود. بیشترین مقدار سفتی در اندازه‌ها متفاوت است و عمدتاً بین ۱۳ تا ۱۶ نیوتن است.

جدول ۸، نتایج مقایسه میانگین‌های فاکتور نوع هلو در شاخص سفتی را در سطح ۵% نشان می‌دهد. در هر سه سطح تفاوت معنی‌دار وجود دارد بیشترین مقدار در رقم بلخی و کمترین مقدار سفتی به نوع زعفرانی اختصاص دارد.

جدول ۸- مقایسه میانگین‌های سفتی در متغیر نوع هلو با آزمون دانکن (N)

نوع هلو	زیرمجموعه		
	۱	۲	۳
زعفرانی	۹/۷۳۵۵		
کاردی		۱۲/۷۲۸۵	
بلخی			۲۵/۸۱۶۵

در سطح ۵%

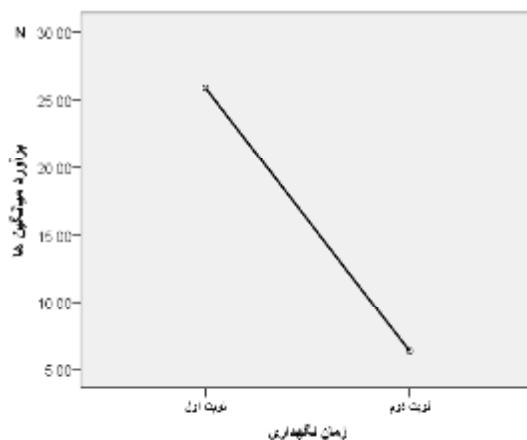
جدول ۹- مقایسه میانگین‌های سفتی در متغیر اندازه هلو با آزمون دانکن (N)

اندازه هلو (mm)	مقایسه میانگین‌های سفتی در متغیر اندازه هلو با آزمون دانکن (N)				
	۱	۲	۳	۴	۵
۶۸	۱۲/۸۵۶۷				
۶۱	۱۳/۶۵۳۳	۱۳/۶۵۳۳			
۶۹		۱۴/۴۹۰۰	۱۴/۴۹۰۰		
۶۶		۱۴/۵۲۶۷	۱۴/۵۲۶۷		
۶۷		۱۴/۸۴۶۷	۱۴/۸۴۶۷		
۷۰		۱۴/۹۵۳۳	۱۴/۹۵۳۳		
۶۵		۱۵/۴۸۰۰			
۶۲				۱/۸۴۰۰	
۶۴				۲۰/۱۲۵۰	۲۰/۱۲۵۰
۶۳				۲۱/۱۶۳۳	

در سطح ۵%

سفتی کاهش یافت. این امر با روند رسیدگی میوه هلو همخوانی داشت.

تفاوت میانگین شاخص سفتی در دو نوبت نگهداری مطابق شکل ۱۳ قابل توجه بود. با افزایش زمان نگهداری میزان



شکل ۱۳- اثر اصلی فاکتور زمان نگهداری در شاخص سفتی

مقاومت بافت به تغییر شکل، تحت اثر نیرو است، این پارامتر یک خاصیت مکانیکی از بافت است که بنا به نظر محققان به خواص ریزساختار تشکیل دهنده محصولات کشاورزی مرتبط است.

دیواره سلولی و فشار تورژانس<sup>۱</sup> نقش موثر در تعیین سفتی و خواص مکانیکی میوه‌ها و سبزی‌ها دارد در طول

در جداول ۱۰، ۱۱ و ۱۲ همبستگی بین شاخص‌های سیگنال فوتوآکوستیک در آزمون غیرمخرب و آزمون نفوذ و خواص فیزیکی ارقام مختلف هلو نشان داده شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده و مطالعات انجام شده در ارتباط با موضوع این پژوهش و در تبیین موارد مرتبط با آزمون‌های غیرمخرب در مقام مقایسه با آزمون‌های مخرب می‌توان بیان داشت که سفتی بافت، مقیاسی برای اندازه

1- Turgor pressure

شاخص بهتری برای بررسی و ارزیابی کیفیت بافت میوه هلو در طول دوره نگهداری آن است.

مقایسه میانگین اثر رقم محصول در شاخص‌های سفتی بافت، مدول کشسانی و بیشینه دامنه سیگنال فوتوآکوستیک و زمان وقوع بیشینه دامنه سیگنال نشان داد، رقم بلخی برای پارامترهای خواص بافتی شامل سفتی یا مدول کشسانی، بالاترین میزان و برای هلو رقم زعفرانی در پائینترین مقدار قرار دارد. نتایج حاضر تنوع بالایی را برای سفتی و مدول کشسانی ارقام هلو در طول دوره نگهداری پس از برداشت نشان می‌دهد که با توجه به اینکه سه رقم مختلف بلخی، کاردی و زعفرانی در شرایط آب و هوایی و مدیریتی یکسان قرار داشتند تفاوت مشاهده شده در سفتی بافت مانند سایر خصوصیات فیزیولوژیکی به تأثیر ژنتیکی آنها مرتبط است. تفاوت در پارامترهای فوتوآکوستیک ارقام هلو ممکن است به دلیل در تغییر در خواص بافتی ناشی از رقم میوه هلو باشد.

برای همه ارقام رابطه معناداری بین محتوای رطوبتی و چگالی و شاخص‌های آزمون مخرب و غیرمخرب مشاهده نشد. شاخص‌های آزمون نفوذ، شامل سفتی و مدول کشسانی با بیشینه دامنه سیگنال دارای همبستگی معنادار مثبت در سطح ۱ درصد هستند، درحالی که همبستگی بین سفتی و مدول کشسانی با زمان وقوع بیشینه دامنه سیگنال دارای ضریب همبستگی منفی در سطح ۵ درصد و صرفاً برای ارقام زعفرانی و کاردی است. نتایج نشان داد همبستگی بالایی بین سفتی و بیشینه دامنه سیگنال برای همه ارقام وجود دارد، به طوری که بالاترین همبستگی بین سفتی و بیشینه دامنه برای هلو رقم بلخی ( $R^2=0/821$ ) است. در هر صورت نتایج برای همه ارقام یکسان نیست که می‌تواند به سبب تغییر در ساختار بافت ناشی از ژنتیک در ارقام هلو باشد.

فرآیند رسیدن میوه و بلوغ، بیشتر حجم آن با کاهش محتوای رطوبتی فشار تورژسانس کاهش یافته و انسجام دیواره سلولی از بین می‌رود و سفتی بافت کاهش می‌یابد (Bayati et al., 2016). نرمی بافت و کاهش بسیار شدید شاخص سفتی آن در یک دوره کوتاه مدت بیان‌کننده، فسادپذیری سریع میوه هلو در طول این دوره است که سبب مساعد شدن شرایط برای ظهور علائم فساد و ایجاد لکه‌های قهوه‌ای رنگ فراهم می‌شود.

یافته‌های پژوهش حاضر در کاهش نیروی نفوذ در طول دوره رسیدگی میوه با نتایج سایر محققین در این زمینه همخوانی دارد.

ساز و کار سیگنال فوتوآکوستیک تولید شده توسط تابش لیزر بر سطح ماده وابسته به خواص مکانیکی ماده تحت تابش و خواص منبع نوری است. بنابراین تغییر در دامنه سیگنال متأثر از موج فشاری اولیه ناشی از تابش لیزر بر سطح بافت محصول ممکن است به دلیل تغییر در مدول کشسانی ناشی از تغییر در ساختار بافت در طول دوره نگهداری یا همان رسیدگی محصول باشد.

کاهش دامنه سیگنال فوتوآکوستیک در حین رسیدگی میوه هلو منطبق با نتیجه پژوهش (Hitchman et al., 2016) در مورد کاهش دامنه این موج در میوه سیب در طول دوره انبارداری آن است. همچنین مطابق معادله (۵) مقیاس زمانی لازم برای انتشار امواج فوتوآکوستیک در میوه متناسب با سرعت صوت در ماده و میزان نفوذ نور در ماده است. با افزایش سرعت صوت در ماده که با خواص مکانیکی ماده و چگالی آن مرتبط است، زمان برای شروع انتشار موج فوتوآکوستیک کاهش یافته و انتشار امواج سریع‌تر اتفاق می‌افتد و متناسب با آن پیک دامنه موج نیز در زمان کمتری اتفاق می‌افتد. چون درصد تغییر زمان وقوع بیشینه سیگنال (۶۱/۶۲) بیشتر از درصد تغییر دامنه سیگنال (۲۲/۰۹) است، این پارامتر فوتوآکوستیکی

جدول ۱۰- ضرایب همبستگی بین پارامترهای تست مخرب نفوذ و تست غیرمخرب فوتوآکوستیک برای هلو رقم بلخی

محتوای رطوبتی (%)	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	سفتی (N)	مدول کشسانی (MPa)	بیشینه دامنه سیگنال (V)	زمان وقوع بیشینه سیگنال ( $\mu\text{s}$ )
۱	۱	۱	۱	۱	۱
۰/۴۰۴	-۰/۲۱۶	-۰/۴۱۲	-۰/۳۱۴	-۰/۱۱۸	-۰/۴۲۰
۰/۴۸۷	-۰/۱۲۰	-۰/۴۶۹	-۰/۳۳۹	-۰/۳۳۹	-۰/۳۳۹
۰/۳۱۴	-۰/۱۲۰	-۰/۴۶۹	-۰/۳۳۹	-۰/۳۳۹	-۰/۳۳۹
-۰/۳۱۴	-۰/۱۲۰	-۰/۴۶۹	-۰/۳۳۹	-۰/۳۳۹	-۰/۳۳۹
-۰/۳۱۴	-۰/۱۲۰	-۰/۴۶۹	-۰/۳۳۹	-۰/۳۳۹	-۰/۳۳۹
-۰/۳۱۴	-۰/۱۲۰	-۰/۴۶۹	-۰/۳۳۹	-۰/۳۳۹	-۰/۳۳۹
-۰/۳۱۴	-۰/۱۲۰	-۰/۴۶۹	-۰/۳۳۹	-۰/۳۳۹	-۰/۳۳۹
-۰/۳۱۴	-۰/۱۲۰	-۰/۴۶۹	-۰/۳۳۹	-۰/۳۳۹	-۰/۳۳۹

\*  $p < 0/05$  و \*\*  $p < 0/01$

جدول ۱۱- ضرایب همبستگی بین پارمترهای تست مخرب نفوذ و تست غیرمخرب فوتوآکوستیک برای هلو رقم کاردی

محتوای رطوبتی (%)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	سفتی (N)	مدول کشسانی (MPa)	بیشینه دامنه سیگنال (V)	زمان وقوع بیشینه سیگنال (μs)
۱	۱	۱	۱	۱	۱
۰/۲۴۸	۰/۳۱	۰/۲۰۰	۰/۲۹۱	۰/۴۰۳	۰/۵۳۴*
۰/۱۲۲	۰/۲۹۹	۰/۱۱۰	۰/۷۸۹**	۰/۵۱۲*	۰/۵۹۶*
۰/۲۴۸	۰/۳۱	۰/۲۰۰	۰/۲۹۹	۰/۴۰۳	۰/۵۳۴*

\* p < ۰/۰۵ و \*\* p < ۰/۰۱

جدول ۱۲- ضرایب همبستگی بین پارمترهای تست مخرب نفوذ و تست غیرمخرب فوتوآکوستیک برای هلو رقم زعفرانی

محتوای رطوبتی (%)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	سفتی (N)	مدول کشسانی (MPa)	بیشینه دامنه سیگنال (V)	زمان وقوع بیشینه سیگنال (μs)
۱	۱	۱	۱	۱	۱
۰/۲۸۱	۰/۳۳۸	۰/۲۵۰	۰/۱۳۵	۰/۴۳۲	۰/۱۰۸
۰/۵۲۹*	۰/۴۲۹	۰/۲۹۲	۰/۵۷۸*	۰/۵۵۷*	۰/۲۸۱
۰/۲۸۱	۰/۳۳۸	۰/۲۵۰	۰/۱۳۵	۰/۴۳۲	۰/۱۰۸

\* p < ۰/۰۵ و \*\* p < ۰/۰۱

## منابع

1. ASAE, Standards. (2008). American Society of Agricultural Engineers, *ASAE S368.4 DEC2000* (R2008).
2. Bárcenas, P., Elortondo, F. J. P., Albisu, M., Mège, J., Roseiro, L. B., Scintu, M. F., & Lavanchy, P. (2007). An international ring trial for the sensory evaluation of raw ewes' milk cheese texture. *International dairy journal*, 17(9): 1139-1147.
3. Bayati, M. R., Rajabipour, A., Mobli, H., Eyvani, A., & Badii, F. (2016). Storability evaluation of Golab apple with acoustic and penetration methods. *Journal of agriculture machinery*, 6(1): 188-200. (In Persian).
4. Chen, L., & Opara, U. L. (2013). Approaches to analysis and modeling texture in fresh and processed foods—A review. *Journal of Food Engineering*, 119(3): 497-507.
5. Culshaw, B., Sorazu, B., Pierce, S. G., McKee, C., & Thursby, G. (2008, January). Laser ultrasound for the non-contact characterisation of the mechanical properties of materials. In *1st International Symposium on Laser Ultrasonics Science, Technology and Applications*, July, 16-18.
6. Diezma-Iglesias, B., Valero, C., Garcia-Ramos, F. J., & Ruiz-Altisent, M. (2006). Monitoring of firmness evolution of peaches during storage by combining acoustic and impact methods. *Journal of Food Engineering*, 77(4): 926-935.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش تغییرات در کیفیت بافت سه رقم میوه هلو (زعفرانی، کاردی و بلخی) با استفاده از روش جدید و غیرمخرب فوتوآکوستیک و روش مخرب نفوذسنجی بررسی شد. تغییرات بیشینه دامنه و زمان وقوع آن در سیگنال فوتوآکوستیک به عنوان شاخص‌های فوتوآکوستیکی بر حسب رقم و در طول زمان رسیدگی بررسی شد. نتایج نشان داد که بیشینه دامنه در طول دوره رسیدگی با کاهش و زمان وقوع بیشینه دامنه با افزایش مواجه شد. همچنین همبستگی بالای بین شاخص‌های سیگنال فوتوآکوستیک و پارامترهای آزمون نفوذ نشان می‌دهد که این روش پیش‌بینی بسیار خوبی برای ارزیابی کیفیت بافت میوه هلو را دارد، هرچند نتایج برای ارقام هلو متفاوت بود. با توجه به نتایج می‌توان گفت که این روش غیرمخرب به خوبی توانایی تشخیص کیفیت بافت در طول دوره نگهداری برای ارقام مختلف هلو را دارد هرچند در این میان چالش‌هایی همچون بررسی تغییرات خواص نوری و گرمایی بافت و تأثیر رنگ ارقام در میزان جذب نور و همچنین اندازه‌گیری سرعت امواج طولی و عرضی صوتی تولید شده نیز مطرح می‌گردد. بنابراین تحقیقات بیشتری برای دستیابی به نتایج مطلوبتر به جهت استفاده از این روش برای ارزیابی کیفیت بافت سایر میوه‌ها و سبزی‌ها توصیه می‌گردد.

21. Paltauf, G., & Dyer, P. E. (2003). Photomechanical processes and effects in ablation. *Chemical reviews*, 103(2): 487-518.
22. Peleg, M. (2006). On fundamental issues in texture evaluation and texturization—A view. *Food Hydrocolloids*, 20(4): 405-414.
23. Tam, A. C. (1986). Applications of photoacoustic sensing techniques. *Reviews of Modern Physics*, 58(2): 381-431.
24. Terefe, N. S., & Versteeg, C. (2011). Texture and Microstructure of Fruits and Vegetables. *Practical Food and Research, Chapter: 4, Publisher: Nova Science Publishers, Editors: Rue Cruz*, 89-11.
25. Van Vliet, T., van Aken, G. A., de Jongh, H. H., & Hamer, R. J. (2009). Colloidal aspects of texture perception. *Advances in Colloid and Interface Science*, 150(1): 27-40.
26. Waldron, K. W., Parker, M. L., & Smith, A. C. (2003). Plant cell walls and food quality. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 2(4): 128-146.
27. Wang, L. V., & Wu, H. I. (2012). *Biomedical optics: principles and imaging*. John Wiley & Sons, 376 p.
28. Zhou, Y., Yao, J., & Wang, L. V. (2016). Tutorial on photoacoustic tomography. *Journal of biomedical optics*, 21(6): 061007.
7. FAO. (2018). *Statistics available at <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>*.
8. Hitchman, S., van Wijk, K., & Davidson, Z. (2016). Monitoring attenuation and the elastic properties of an apple with laser ultrasound. *Postharvest Biology and Technology*, 121: 71-77.
9. Huang, M., & Lu, R. (2010). Apple mealiness detection using hyperspectral scattering technique. *Postharvest Biology and Technology*, 58(3): 168-175.
10. Kim, E. H. J., Corrigan, V. K., Wilson, A. J., Waters, I. R., Hedderley, D. I., & Morgenstern, M. P. (2012). Fundamental fracture properties associated with sensory hardness of brittle solid foods. *Journal of Texture Studies*, 43(1): 49-62.
11. 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(1): 44-48.
12. Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., Sanders, J. V. (2002). *Fundamentals of acoustics*. 4th Edition. New York, Wiley.
13. Lu, R., & Peng, Y. (2006). Hyperspectral scattering for assessing peach fruit firmness. *Biosystems engineering*, 93(2): 161-171.
14. Lu, R. (2007). Nondestructive measurement of firmness and soluble solids content for apple fruit using hyperspectral scattering images. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 1(1): 19.
15. Ma, C., Feng, L., Pan, L., Wei, K., Liu, Q., Tu, K., & Peng, J. (2020). Relationships between optical properties of peach flesh with firmness and tissue structure during storage. *Postharvest Biology and Technology*, 163: 111134.
16. Manohar, S., & Dantuma, M. (2019). Current and future trends in photoacoustic breast imaging. *Photoacoustics*, 16: 100134.
17. Mizrach, A. (2008). Ultrasonic technology for quality evaluation of fresh fruit and vegetables in pre-and postharvest processes. *Postharvest biology and technology*, 48(3): 315-330.
18. Mohsenin, N. N. (1984). *Physical properties of food and agricultural materials*. Gordon and Breach Science Publishers. 147 p.
19. Morrison, D. S., & Abeyratne, U. R. (2014). Ultrasonic technique for non-destructive quality evaluation of oranges. *Journal of Food Engineering*, 141: 107-112.
20. Nikitichev, D. I., Xia, W., Hill, E., Mosse, C. A., Perkins, T., Konyon, K., & Vercauteren, T. (2016). Music-of-light stethoscope: a demonstration of the photoacoustic effect. *Physics education*, 51(4): 045015.

