

## Nondestructive Apple Quality Assessment Using Acoustic-Vibrational Response and Artificial Neural Networks

Zahed Fathizadeh<sup>1\*</sup>, Mohammad Aboonajmi<sup>2</sup>, Seyed-Raza Hassan-Beygi

Department of Agrotechnology, Abouraihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>1\*</sup>zahed.fathizadeh@ut.ac.ir

<sup>2</sup>abonajmi@ut.ac.ir

### Abstract

In this paper, acoustic and vibration response methods were used to nondestructively estimate the firmness of apples. Gala apples were stored at 0 and 20° C for 9 and 6 weeks and were tested for acoustic response every week during storage. During the test, the samples were placed on a special device designed and made for this test and stimulated with a gentle tap. Impact sound and vibration were received by the microphone and accelerometer and transmitted as analog signals to the computer sound card and then converted to digital signals. Digital signals were converted from time domain to frequency domain by Fourier transform in MATLAB software. The dominant frequencies of the sound and vibration signals were extracted, and the firmness indices were obtained from special equations. The results of acoustic and vibration tests were compared with the results of puncture test. The correlation coefficient between puncture firmness and firmness index was more than 92%, which was significant at the level of 1%. Also, the dominant acoustic and vibrational frequencies and mass of the samples were used as three features as single, binary, and ternary using artificial neural network to estimate the shelf life of apples. The shelflife was estimated at one, two and three weeks intervals and the results of fusion of binary and ternary in different modes increased from 9% to 30% the accuracy of classification of individual features.

**Keywords:** Nondestructive testing, Acoustic response, Apple Firmness, Apple quality assessment

## کیفیت‌سنجی غیرمخرب میوه سیب با استفاده از امواج صوتی، ارتعاشی و شبکه عصبی مصنوعی

زاهد فتحی زاده<sup>۱\*</sup>، محمد ابونجمی<sup>۲</sup>، سیدرضا حسن بیگی

گروه فنی کشاورزی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۱</sup>\*zahed.fathizadeh@ut.ac.ir

<sup>۲</sup>abonajmi@ut.ac.ir

### چکیده

در این مقاله از روش پاسخ صوتی و ارتعاشی برای تخمین میزان سفتی سیب به صورت غیرمخرب استفاده شد. سیب‌های رقم گالا در دو دمای صفر و ۲۰ درجه سلسیوس به مدت ۹ و ۶ هفته نگهداری شدند و در طول دوره انبارمانی هر هفته مورد آزمایش پاسخ ضربه صوتی قرار گرفتند. نمونه‌ها در طی آزمایش روی دستگاه مخصوص که برای این آزمایش طراحی و ساخته شد، قرار گرفتند و با یک ضربه ملایم تحریک شدند. صدا و ارتعاش ناشی از ضربه توسط میکروفون و شتاب‌سنج دریافت و به صورت سیگنال‌های آنالوگ به کارت صدای رایانه منتقل و سپس تبدیل به سیگنال‌های دیجیتال شدند. سیگنال‌های دیجیتال توسط تبدیل فوریه در نرم افزار متلب از حوزه زمان به حوزه فرکانس تبدیل شدند. فرکانس‌های غالب سیگنال‌های صوتی و ارتعاشی استخراج و شاخص‌های سفتی از روابط مخصوص به دست آمد. نتایج آزمون‌های صوتی و ارتعاشی با نتایج آزمون نفوذسنجی مقایسه شد. ضریب همبستگی میان سفتی پانچ و شاخص سفتی بیش از ۰/۹۲ بود که در سطح احتمال ۱٪ معنی دار بود. همچنین فرکانس‌های غالب صوتی و ارتعاشی و جرم نمونه‌ها به عنوان سه ویژگی به صورت تکی، دوتایی و سه‌تایی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین عمر انبارمانی سیب مورد استفاده قرار گرفت. عمر انبارمانی در بازه‌های زمانی یک، دو و سه هفته‌ای تخمین زده شد و نتایج ترکیب دوتایی و سه‌تایی در حالت‌های مختلف از ۹٪ تا ۳۰٪ دقت طبقه‌بندی ویژگی‌های تکی را افزایش داد.

**واژگان کلیدی:** آزمون غیرمخرب، پاسخ صوتی، سفتی سیب، کیفیت‌سنجی سیب

### ۱- مقدمه

برداشت شده دارد همچنین زمان طولانی انبارمانی باعث وقوع فعل و انفعالات شیمیایی درون سیب و تغییر در بافت و کاهش کیفیت میوه می شود. از طرفی دیگر تقاضای مصرف کننده برای محصولات با کیفیت [۱] و رقابت توزیع کنندگان برای کسب سهم بیشتر بازار با ارایه محصول با کیفیت بالاتر، کیفیت سنجی و درجه بندی محصولات بر اساس کیفیت را در طول دوره انبارمانی و در هنگام درجه بندی محصولات ضروری می‌سازد [۲].

در این میان روش های کیفیت سنجی غیرمخرب به دلیل حفظ محصول و امکان کیفیت سنجی تک تک نمونه ها و امکان بکارگیری این روش ها به صورت برخط، نسبت به روش های مخرب ارجحیت دارند. روش تحلیل پاسخ صوتی به دلیل هزینه پایین، سرعت بالا، ایمن بودن و سادگی نسبت به روش هایی مانند اشعه ایکس و الکترومغناطیس

سیب یکی از منابع غذایی مهم بشر محسوب می شود که علاوه بر تازه خوری به اشکال گوناگون و به صورت فراوری شده مصرف می شود. بر اساس آخرین آمار سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد (FAO) در سال ۲۰۱۹ تولید سالانه سیب در کل دنیا ۴۱ میلیون تن است که پس از انگور و موز در رتبه سوم قرار دارد. بر اساس آمار وزارت جهاد کشاورزی میوه سیب پس از پرتقال و انگور با ۲/۹ میلیون تن و ۱۴/۳ درصد، رتبه سوم تولید در میان محصولات باغی کشور را به خود اختصاص داده است. بخش زیادی از سیب تولید شده پس از برداشت در سردخانه ها برای مدت چند ماه نگهداری می شود تا در خارج از فصل تولید نیز امکان توزیع در بازار وجود داشته باشد. از یک طرف زمان و شیوه برداشت تاثیر زیادی در دوام و حفظ کیفیت میوه های

پردیس ابوریحان دانشگاه تهران منتقل شدند. تعدادی از نمونه‌ها برای انجام آزمایشات اولیه جدا و مابقی آنها به دو دسته تقسیم شدند، یکی از دسته‌ها در دمای صفر درجه سلسیوس و رطوبت ۹۵٪ درصد و دسته دیگر در دمای ۲۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۴۰٪ نگهداری شدند. هر هفته تعداد ۱۰ نمونه از هر دسته به طور تصادفی انتخاب و مورد آزمایش قرار گرفتند. ابتدا ابعاد و جرم هر نمونه اندازه‌گیری شد و سپس آزمایش پاسخ صوتی (در محیطی که کاملاً از نظر صوتی عایق بندی شده بود) و پس از آن آزمون نفوذسنجی روی آن انجام شد. نمونه‌های نگهداری شده در دمای صفر درجه تا ۹ هفته مورد آزمایش قرار گرفتند اما نمونه‌های نگهداری شده در دمای ۲۰ درجه فقط تا ۶ هفته مورد آزمایش قرار گرفتند و پس از آن کاملاً پلاسیده شده و قابل آزمایش نبودند. در پایان آزمایش‌ها همه داده‌ها که دسته‌بندی و مرتب شده بودند مورد پردازش قرار گرفته و نتایج مورد نظر از آنها استخراج شد. در هر هفته، داده‌های ۱۰ نمونه مورد آزمایش (جرم و فرکانس‌های غالب صوتی و ارتعاشی) جمع‌آوری می‌شد و میانگین آنها به عنوان داده‌های مربوط به آن هفته مورد تحلیل قرار می‌گرفت.

## ۲-۲ آزمون غیرمخرب پاسخ صوتی

ابتدا دستگاهی ویژه آزمایش پاسخ صوتی طراحی و ساخته شد. این دستگاه شامل محل قرارگیری سیب، مکانیزم ضربه‌زن آونگی، میکروفون و شتاب سنج (به عنوان حسگر ارتعاش)، برد آردوینو برای کنترل دستگاه و ارتباط با رایانه و چارچوب دستگاه است (شکل ۱). این دستگاه از طریق کابل usb به رایانه وصل و توسط کدهای نوشته شده در نرم افزار Matlab کنترل می‌شود. با فرمان رایانه دستگاه، آونگ را تا زاویه مشخص شده و قابل تنظیم بلند و آن را رها می‌کند، آونگ ضربه ای ملایم و غیرمخرب به سیب وارد می‌نماید. صدای ناشی از ضربه توسط میکروفون و کابل هم‌محور به کارت صدای رایانه منتقل می‌شود و توسط آن به سیگنال‌های دیجیتال تبدیل می‌شود. سیگنال‌های صوتی آنالوگ با سرعت نمونه‌برداری ۹۶۰۰۰ هرتز و تفکیک ۱۶ بیت به سیگنال‌های دیجیتال تبدیل شدند. در شکل زیر طرحواره دستگاه سفتی سنج صوتی نشان داده شده است. ضربه‌زنی روی خط استوای میوه و با چهار تکرار در چهار

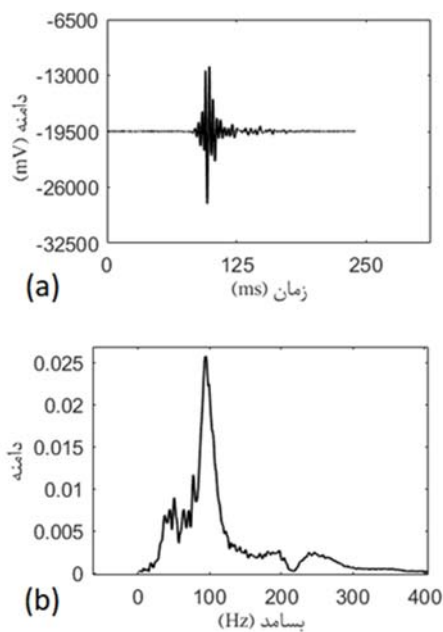
توسعه زیادی یافته اند و در بسیاری از حوزه‌ها از جمله حوزه کشاورزی و صنایع غذایی قابل استفاده است [۳]. روش‌های صوتی توسط محققان برای کیفیت سنجی بسیاری از محصولات کشاورزی مانند سیب [۴]، [۵]، گوجه‌فرنگی [۶]، شلیل [۷]، هلو [۸]، گلابی [۹]، خربزه [۱۰]–[۱۲] و هندوانه [۱۳] مورد استفاده قرار گرفته است. در مورد سیب خصوصیات بافت خصوصاً سفتی، از شاخص‌های مهم کیفیت‌سنجی محسوب می‌شوند. سفتی بافت میوه شاخصی برای تعیین رسیدگی و همچنین تازگی میوه است [۱۴]. سفتی میوه‌ها با استفاده از روش‌های مخرب مانند آزمون نفوذسنجی پانچ قابل اندازه‌گیری است، در این روش نیروی لازم برای نفوذ سنج در عمق مشخص یا نیروی بیشینه در نمودار زمان-نیرو اندازه‌گیری می‌شود و به عنوان شاخص سفتی تعیین می‌شود. امروزه روش پاسخ صوتی یکی از روش‌های غیرمخرب سفتی سنجی محصولات کشاورزی و باغی است که به عنوان جایگزینی مناسب برای روش نفوذسنجی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

چن و همکاران نشان دادند که پاسخ صوتی میوه سیب با سفتی آن در ارتباط است و این موضوع را با تغییر هم‌سوی دو پارامتر پاسخ صوتی و سفتی سیب پس از برداشت سیب تایید کردند. در پژوهش حاضر از روش پاسخ صوتی برای تعیین سفتی سیب استفاده و نتایج آزمون صوتی با نتایج روش نفوذسنجی مقایسه شده است. علاوه بر این، امواج ارتعاشی نیز مورد تحلیل قرار گرفته و کلیه تحلیل‌ها علاوه بر امواج صوتی، روی امواج ارتعاشی نیز انجام شده است. علاوه بر این آزمایش‌ها روی نمونه‌های نگهداری شده در دو دمای مختلف صفر و ۲۰ درجه در طول انبارمانی پس از برداشت (با در نظر گرفتن پارامتر زمان) انجام شده است. نوآوری دیگری که در این تحقیق صورت گرفت تخمین عمر انبارمانی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و ترکیب داده‌ها (Data Fusion) است [۴]، [۵].

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱ نمونه‌ها و نحوه آزمایش

نمونه‌های سیب از رقم گالا از باغ آموزشکده کشاورزی شهرستان دماوند در مرداد ماه ۱۳۹۸ در ابعاد و ظاهر تقریباً یکسان انتخاب شدند. این نمونه‌ها به سرعت و تحت شرایط مناسب (حمل و نقل با وسیله مجهز به کولر) به سردخانه



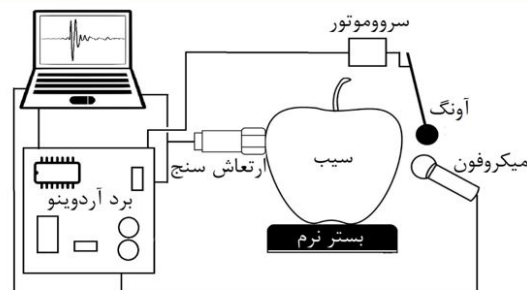
شکل ۲- نمونه ای از سیگنال صوتی و طیف فرکانسی متناظر با آن

### ۳-۲ آزمون نفوذسنجی

آزمون نفوذسنجی به عنوان مرجعی برای اعتبارسنجی آزمون غیرمخرب اجرا شد. این آزمون توسط دستگاه چندمنظوره موجود در گروه فنی کشاورزی پردیس ابوریحان انجام شد. برای این منظور بر اساس استاندارد [16] ASAE سنجه استوانه‌ای به قطر ۸ میلی‌متر با سرعت پیشروی ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه در سیب نفوذ کرد و بصورت همزمان میزان نیروی نفوذ با سرعت نمونه برداری ۲۰ نمونه در ثانیه ثبت شده و نمودار نیرو-زمان رسم شد. بیشینه نیروی نفوذ (N) به عنوان میزان سفتی نمونه در نظر گرفته شد. آزمون نفوذسنجی نیز در دو نقطه آفتاب زده و آفتاب نزده مقابل هم بر روی محیط و خط استوای میوه سیب که سفتی آنها تفاوتی جزئی دارد، انجام شده و میانگین سفتی دو نقطه به عنوان سفتی کل میوه در نظر گرفته شد. در شکل ۳ نحوه انجام آزمون نفوذسنجی نشان داده شده است.

نمونه‌ای از نمودار نیرو-زمان بدست آمده از آزمون نفوذسنجی در شکل ۴ نشان داده شده است.

نقطه با زاویه ۹۰ درجه نسبت به هم انجام شد. سیگنال‌های صوتی دیجیتال توسط کدهای نوشته شده با تبدیل فوریه گسسته سریع به حوزه فرکانس تبدیل و بدین صورت فرکانس‌های غالب آن استخراج شد.



(a)



(b)

شکل ۱- طرحواره دستگاه سفتی سنج صوتی-ارتعاشی (a) شکل دستگاه سفتی سنج صوتی-ارتعاشی (b)

میانگین فرکانس بیشینه ناشی از چهار ضربه به عنوان فرکانس غالب نمونه در نظر گرفته می‌شود. شاخص سفتی (Firmness Index) FI با استفاده از رابطه (۱) بدست می‌آید [۱۵].

$$FI = f^2 m^{2/3} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه  $f$  فرکانس غالب (Hz) و  $m$  جرم نمونه (Kg) است.

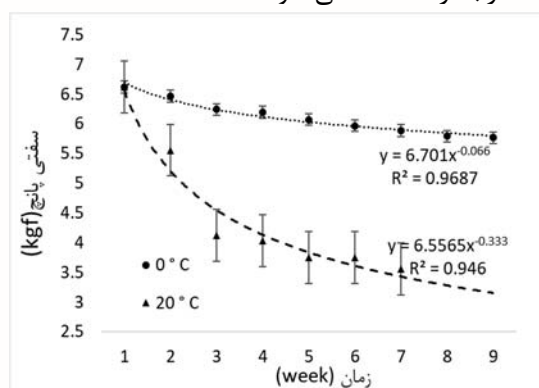
در شکل ۲ نمونه ای از سیگنال صوتی و طیف فرکانسی متناظر با آن را مشاهده می‌نمایید.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۱-۳ تغییرات سفتی و فرکانس های غالب صوتی و

##### ارتعاشی سیب در دوره انبارمانی

پس از برداشت سیب به تدریج سفتی آن کاهش می‌یابد و در واقع کیفیت بافت آن کمتر می‌شود. آهنگ افت کیفیت با افزایش دما سریع‌تر می‌شود به طوری که سیب‌های نگهداری شده در دمای صفر درجه پس از ۹ هفته همچنان قابل استفاده بودند در حالیکه سیب‌های نگهداری شده در دمای ۲۰ درجه پس از ۶ هفته دیگر قابل استفاده نبودند و انجام آزمایش روی آنها امکان‌پذیر نبود. در شکل ۵ روند تغییرات سفتی سیب در دوره انبارمانی در دو دمای صفر و ۲۰ درجه را مشاهده می‌شود.



شکل ۵- روند تغییرات سفتی سیب در دوره انبارمانی

همانطور که در شکل دیده می‌شود با گذشت زمان سرعت کاهش سفتی کمتر می‌شود. بنابراین از رگرسیون توانی برای رسم نمودار استفاده شده است. با توجه به شدت بیشتر تغییرات در دمای ۲۰ درجه، نمودار مربوط به این دما ضریب تبیین کمتری (۰,۹۴۶) نسبت به دمای صفر درجه (۰,۹۶۹) دارد.

فرکانس‌های غالب صوتی و ارتعاشی سیب در دوره انبارمانی نیز روند نزولی را طی کردند. در جدول ۱ تغییرات فرکانس‌های غالب صوتی و ارتعاشی نشان داده شده است.

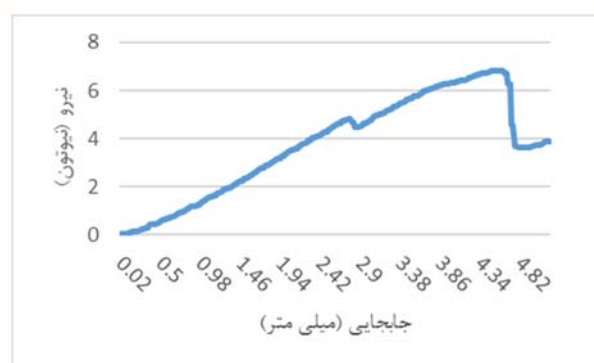
#### ۲-۳ تغییر شاخص های سفتی صوتی و ارتعاشی

##### سیب در دوره انبارمانی

تغییرات شاخص های سفتی هم روندی مشابه با سفتی پانچ داشت. شاخص‌ها در دوره انبارمانی به تدریج افت پیدا کردند و سرعت افت با گذشت زمان کمتر می‌شد. روند کاهش در دمای ۲۰ درجه شدیدتر از دمای صفر درجه بود.



شکل ۳- آزمون نفوذسنجی



شکل ۴- نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمون نفوذسنجی

#### ۲-۴ پردازش داده‌ها

تبدیل فوری استخراج فرکانس‌های غالب، ذخیره اطلاعات سیگنال‌ها و طراحی شبکه عصبی مصنوعی همه در نرم‌افزار Matlab انجام شد. شاخص سفتی با استفاده از آزمون صوتی و رابطه (۱) بدست آمد و با نتایج آزمون نفوذسنجی مقایسه و میزان همبستگی آنها محاسبه شد. همچنین از شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین عمر انبارمانی استفاده شد. سه ویژگی فرکانس غالب صوتی، فرکانس غالب ارتعاشی و جرم نمونه‌ها به عنوان ورودی و عمر انبارمانی در بازه‌های زمانی یک، دو و سه هفته‌ای به عنوان هدف وارد شبکه عصبی مصنوعی شد. شبکه عصبی از نوع پرسپترون چندلایه انتخاب شد.

جدول ۱- تغییرات فرکانس‌های غالب صوتی و ارتعاشی در دوره انبارمانی

	فرکانس غالب صوتی		فرکانس غالب ارتعاشی	
	20 °C	0 °C	20 °C	0 °C
هفته اول	942.2	942.2	281.4	281.4
هفته دوم	901.2	713.8	214.46	265.86
هفته سوم	838.36	610.4	200.88	263.42
هفته چهارم	749.42	630.26	187.22	249.42
هفته پنجم	648.975	478.0667	190.0292	244.6393
هفته ششم	746.1064	493.9833	192.8875	234.1386
هفته هفتم	655.8286			221.7714
هفته هشتم	612.2575			232.1475
هفته نهم	619.4			207.1667

توانستند سفتی سیب را تخمین بزنند. در دمای صفر درجه شاخص سفتی صوتی ۹۷/۴٪ و شاخص سفتی ارتعاشی ۹۸/۶٪ (در سطح ۰,۰۰۱ معنی دار) و در دمای ۲۰ درجه شاخص سفتی صوتی ۹۶٪ و شاخص سفتی ارتعاشی ۹۲/۶٪ (در سطح ۰,۰۱ معنی دار) با سفتی آزمون نفوذسنجی همبستگی داشتند. میزان همبستگی شاخص های سفتی با سفتی آزمون نفوذسنجی در جدول ۲ نشان داده شده است.

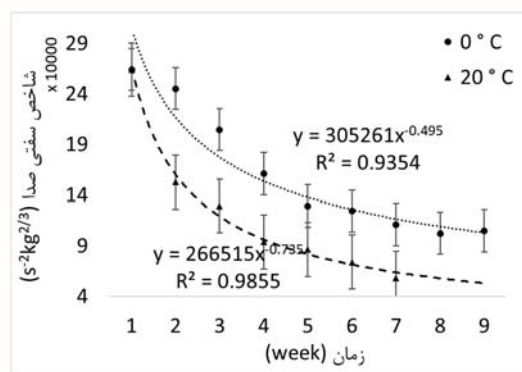
جدول ۲- همبستگی میان شاخص های سفتی با سفتی نفوذسنجی

شاخص سفتی ارتعاش		شاخص سفتی صدا		دما
°C ۲۰	°C ۰	°C ۲۰	°C ۰	
**۰/۹۲۶	*۰/۹۸۶	**۰/۹۶۰	*۰/۹۷۴	سفتی

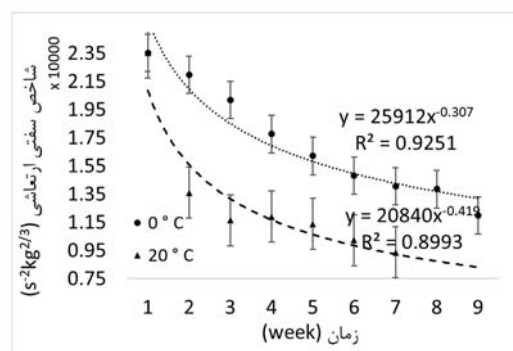
۰/۰۱, \*\* P < ۰/۰۰۱ \* P <

از جدول فوق پیداست که همبستگی شاخص ها در دمای صفر درجه بیشتر از ۲۰ درجه است، همچنین نتایج دمای صفر درجه نسبت به ۲۰ درجه در سطح بالاتری معنی دار هستند و این به معنای دقت بیشتر نتایج دمای صفر درجه هستند. دلیل این امر آن است که تغییرات شدید سفتی در دمای ۲۰ درجه به حدی بود که در اواخر دوره نگهداری، سیب ها قابل استفاده برای انجام آزمایشات نبودند. تغییرات سفتی در این دما به دلیل تبخیر بیش از حد با کاهش شدید رطوبت نمونه ها و در نتیجه کوچک شدن اندازه و کاهش وزن همراه است بنابراین محاسبات شاخص ها را که دارای

در شکل های ۶ و ۷ روند تغییرات شاخص های سفتی صوتی و ارتعاشی در طول دوره انبارمانی نشان داده شده است.



شکل ۶- تغییرات شاخص سفتی صوتی در دوره انبارمانی



شکل ۷- تغییرات شاخص سفتی ارتعاشی در دوره انبارمانی

### ۳-۳ مقایسه نتایج آزمون نفوذسنجی با شاخص های سفتی

شاخص های سفتی صوتی و ارتعاشی همبستگی بالایی با نتایج آزمون نفوذسنجی داشتند. این شاخص ها به خوبی

به ترکیب هر سه ویژگی صوتی، ارتعاشی و جرم بود که برای دمای صفر درجه همه نتایج بالای ۹۰٪ هستند و قابلیت اطمینان بالایی دارند. نتیجه دیگری که از جداول فوق پیداست آنست که طبقه بندی بر اساس بازه زمانی یک هفته ای کمترین دقت را دارد اما برای دمای صفر درجه طبقه بندی سه هفته ای و برای دمای ۲۰ درجه طبقه بندی دو هفته ای بیشترین دقت را دارند. بدیهی است هرچه بازه زمانی طبقه بندی بیشتر باشد دقت طبقه بندی بیشتر خواهد بود اما در دمای ۲۰ درجه به دلیل تغییر بیش از حد بافت نمونه ها در اواخر دوره انبارمانی، همانطور که در بخش های قبلی نیز اشاره شد، نتایج تحت تاثیر قرار گرفت و دقت آنها پایین آمد. فرکانس های ارتعاشی کمترین دقت را در پیش بینی عمر انبارمانی سیب دارند. حتی ترکیب دوتایی فرکانس ارتعاشی و جرم هم مقادیر نسبتا پایینی دارند اما سهیم بودن این ویژگی در ترکیب سه تایی تاثیر مثبتی دارد و موجب بالا رفتن دقت نتایج شده است. فرکانس های غالب ارتعاشی و شاخص سفتی بدست آمده از آن در تخمین ضریب کشسانی میوه سیب دقت بالاتری نسبت به فرکانس ها و شاخص های سفتی صوتی دارند [18], [19]. در جدول ۵ میانگین دقت ویژگیهای تکی (فرکانس صوتی و ارتعاشی و جرم) مشاهده می شود.

جدول ۳- نتایج طبقه بندی شبکه عصبی (تکی، ترکیب

دوتایی و سه تایی) برای دمای صفر درجه

	یک هفته	دوهفته	سه هفته
فرکانس صوتی (A)	0.62	0.74	0.71
فرکانس ارتعاشی (V)	0.51	0.6	0.78
جرم (M)	0.58	0.71	0.84
صوتی+ارتعاش (AV)	0.67	0.76	0.78
ارتعاشی+جرم (VM)	0.64	0.69	0.8
صوتی+جرم (AM)	0.71	0.76	0.91
صوتی+ارتعاشی+جرم (AVM)	0.87	0.88	0.96

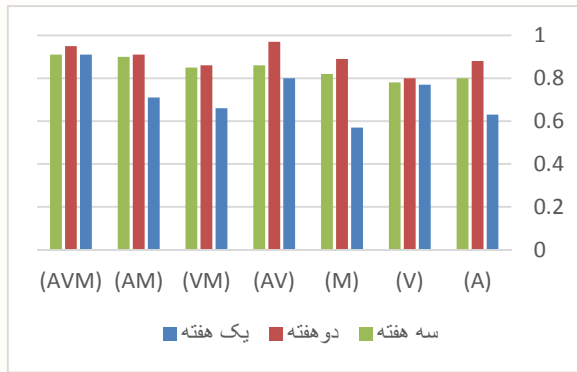
با مقایسه نتایج جدول ۵ با جداول ۳ و ۴ مشخص است که افزایش دقت طبقه بندی با ترکیب ویژگی ها برای دمای صفر و ۲۰ درجه و بازه های زمانی مختلف از ۹٪ (بازه زمانی دو هفته ای و دمای ۲۰ درجه) تا ۳۰٪ (بازه زمانی یک هفته ای و دمای صفر درجه) بوده است و این افزایش دقت در

پارامتر جرم نیز هست، تحت تاثیر قرار می دهد. نتیجه دیگری که از جدول فوق قابل برداشت است این است که میانگین ضرایب همبستگی برای شاخص سفتی صوتی (۰/۹۶۷) بیش از میانگین برای شاخص سفتی ارتعاشی (۰/۹۵۶) است، همچنین ضرایب همبستگی در دو دما، برای شاخص سفتی صوتی نسبت به شاخص سفتی ارتعاشی، مقادیر نزدیک به هم دارند و این بدان معناست که شاخص سفتی صوتی برای تخمین سفتی واقعی سیب (سفتی آزمون نفودسنجی) قابل اعتمادتر از شاخص سفتی ارتعاشی است. از مباحث فوق می توان نتیجه گرفت هرچه دمای نگهداری سیب پایین تر باشد شاخص های سفتی صوتی و ارتعاشی تخمین های دقیق تری از سفتی سیب دارند.

#### ۳-۴ تلفیق داده ها با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

ترکیب داده ها در سطح ویژگی انجام شد [17]، برای این منظور ویژگیهای سه گانه (فرکانس های غالب صوتی و ارتعاشی و جرم) به صورت تکی، دوتایی و سه تایی به شبکه عصبی داده شدند. از شبکه عصبی برای طبقه بندی نمونه ها بر اساس عمر انبارمانی در بازه های یک، دو و سه هفته ای استفاده شد. ساختار شبکه عصبی به روش آزمایش و خطا تعیین شد و در نهایت شبکه عصبی با ۴۰ نورون در لایه پنهان برای بازه زمانی یک هفته ای و ۲۰ نورون در لایه پنهان برای بازه های دو و سه هفته ای انتخاب شد. تعداد نورون های لایه ورودی و خروجی هم برابر تعداد کلاس ها و ویژگی ها تعیین شدند. در نهایت ۷۰٪ از نمونه ها برای آموزش شبکه (Training)، ۱۵٪ برای اعتبارسنجی (Validation) و ۱۵٪ دیگر برای آزمایش (Test) مورد استفاده قرار گرفتند. دقت طبقه بندی بر اساس نتایج آزمایش (Test) تعیین شد. نتایج طبقه بندی در جدول های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

همانطور که در جداول دیده می شود نتایج طبقه بندی بر اساس ویژگیهای تکی مقادیر پایینی دارند و همگی مابین ۵۰٪ و ۹۰٪ هستند این مقادیر قابلیت اطمینان پایینی دارند و در کاربردهای واقعی قابل اتکا نیستند، ترکیب های دوتایی مقادیر بیشتری دارند خصوصا ترکیب فرکانس صوتی و جرم نتایج نسبتا بهتری دارد و قابلیت اطمینان بالاتری نسبت به نتایج تکی دارد. اما بالاترین نتایج مربوط



شکل ۹- تغییرات نتایج طبقه بندی ترکیب های مختلف ویژگی های سه گانه در دمای ۲۰ درجه

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که با استفاده از روش غیرمخرب پاسخ صوتی و ارتعاشی می توان با دقت بالایی (بیش از ۹۵٪) میزان سفتی سیب را که شاخصی از کیفیت بافت آن است تخمین زد. این روش روی همه نمونه ها بدون آسیب زدن به آنها قابل اجرا است و از این رو می تواند به عنوان راهکاری برای کیفیت سنجی برخط محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد.

همچنین از فرکانس های غالب به دست آمده در آزمون پاسخ صوتی و ارتعاشی و جرم نمونه ها به عنوان سه ویژگی برای تخمین عمر انبارمانی سیب توسط شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. سه ویژگی توسط شبکه عصبی مصنوعی با هم ترکیب شدند و دقت طبقه بندی ویژگی های ترکیبی را به میزان ۹٪ تا ۳۰٪ افزایش داد.

از روش غیر مخرب پاسخ صوتی و ارتعاشی و ترکیب داده ها با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی می توان علاوه بر سیب برای کیفیت سنجی غیرمخرب بسیاری از محصولات کشاورزی مانند گوجه فرنگی، گلابی، هندوانه و خربزه، کیوی [21] و انبه [22] استفاده کرد. نتایج نشان می دهد با دستگاه ساخته شده برای آزمون پاسخ ضربه صوتی، این روش پتانسیل استفاده به عنوان یک روش سریع، ارزان و قابل اعتماد در خطوط درجه بندی محصولات غذایی و کشاورزی را با دقت بالا دارا است.

#### ۵- منابع

- [1] L. Chen and U. L. Opara, "Texture measurement approaches in fresh and processed foods - A review," *Food Res. Int.*, vol. 51, no. 2, pp. 823-835, 2013, doi: 10.1016/j.foodres.2013.01.046.

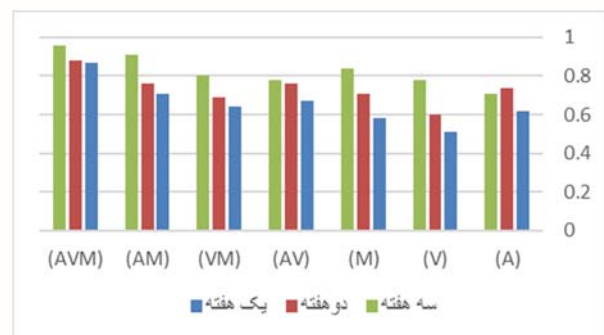
کیفیت سنجی دقیق محصولات کشاورزی بسیار سودمند است و موجب افزایش قابلیت اطمینان و کاهش عدم قطعیت می شود. در شکل ۸ و ۹ نمودار تغییرات دقت طبقه بندی ترکیب های مختلف ویژگی های سه گانه نشان داده شده است.

جدول ۴- نتایج طبقه بندی شبکه عصبی (تکی، ترکیب دوتایی و سه تایی) برای دمای ۲۰ درجه

	یک هفته	دو هفته	سه هفته
فرکانس صوتی (A)	0.63	0.88	0.8
فرکانس ارتعاشی (V)	0.77	0.8	0.78
جرم (M)	0.57	0.89	0.82
صوتی+ارتعاش (AV)	0.8	0.97	0.86
ارتعاشی+جرم (VM)	0.66	0.86	0.85
صوتی+جرم (AM)	0.71	0.91	0.90
صوتی+ارتعاشی+جرم (AVM)	0.91	0.95	0.91

جدول ۵- میانگین دقت طبقه بندی ویژگی های ترکیبی

یک هفته	دو هفته	سه هفته
دمای صفر درجه		
57	68	78
دمای ۲۰ درجه		
66	86	80



شکل ۸- تغییرات نتایج طبقه بندی ترکیب های مختلف ویژگی های سه گانه در دمای صفر درجه

در تحقیق مشابه لشگری و همکاران از روش ترکیب پاسخ صوتی با یادگیری عمیق برای طبقه بندی میزان آردی شدن سیب استفاده کردند و آزمون فشرده سازی و میزان سختی و آبداری سیب را به عنوان مرجع در نظر گرفتند. دقت طبقه بندی در این پژوهش برای سیب های آردی و غیرآردی به ترتیب ۹۱/۱۱ و ۸۶/۹۴ درصد بود [20].



- [13] J. Mao, Y. Yu, X. Rao, and J. Wang, "Firmness prediction and modeling by optimizing acoustic device for watermelons," *J. Food Eng.*, vol. 168, pp. 1–6, 2016, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2015.07.009.
- [14] A. Haiati, M. H. Raofat, S. Kamgar, and F. Jahani, "Feasibility of using electrical capacitance for determining the fruit ripeness of apple," *Iran. J. Biosyst. Eng.*, vol. 49, no. 2, pp. 195–203, 2018, doi: 10.22059/ijbse.2018.218246.664861.
- [15] J. R. Cooke, "An Interpretation of the Resonant Behavior of Intact Fruits and Vegetables," *Trans. ASAE*, vol. 15, no. 6, pp. 1075–1080, 1972, doi: 10.13031/2013.38074.
- [16] ASAE Standards, *Compression test of food materials of convex shape*. 2008.
- [17] F. Castanedo, "A review of data fusion techniques," *ScientificWorldJournal*, vol. 2013, p. 704504, 2013, doi: 10.1155/2013/704504.
- [18] Z. Fathizadeh, M. Aboonajmi, and S. R. Hassan-Beygi, "Design, fabrication and test of integrated acoustic-vibration Fruit Texture Analyzer," *Iran. J. Biosyst. Eng.*, vol. 51, no. 2, pp. 295–304, 2020, doi: 10.22059/ijbse.2020.286315.665215.
- [19] Z. Fathizadeh, M. Aboonajmi, and S. R. Hassan Beygi, "Classification of apples based on the shelf life using ANN and data fusion," *Food Anal. Methods*, vol. 13, no. 12, 2020, doi: 10.1007/s12161-020-01913-1.
- [20] M. Lashgari, A. Imanmehr, and H. Tavakoli, "Fusion of acoustic sensing and deep learning techniques for apple mealiness detection," *J. Food Sci. Technol.*, Jan. 2020, doi: 10.1007/s13197-020-04259-y.
- [21] H. Li, P. Pidakala, D. Billing, and J. Burdon, "Kiwifruit firmness: Measurement by penetrometer and non-destructive devices," *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 120, pp. 127–137, 2016, doi: 10.1016/j.postharvbio.2016.06.007.
- [22] M. Valente, R. Leardi, G. Self, G. Luciano, and J. P. Pain, "Multivariate calibration of mango firmness using vis/NIR spectroscopy and acoustic impulse method," *J. Food Eng.*, vol. 94, no. 1, pp. 7–13, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2009.02.020.
- [2] Z. Fathizadeh, M. Aboonajmi, and S. R. H. Beygi, "Nondestructive firmness prediction of apple fruit using acoustic vibration response," *Sci. Hortic.*, vol. 262, no. November 2019, p. 109073, 2020, doi: 10.1016/j.scienta.2019.109073.
- [3] M. Aboonajmi, M. Jahangiri, and S. R. Hassan-Beygi, "A Review on Application of Acoustic Analysis in Quality Evaluation of Agro-food Products," *J. Food Process. Preserv.*, vol. 39, no. 6, pp. 3175–3188, 2015, doi: 10.1111/jfpp.12444.
- [4] H. Chen, "Analysis of the acoustic impulse resonance of apples for nondestructive estimation of fruit quality," Katholieke Univ. Leuven, 1993. [Online]. Available: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=BE9400257>
- [5] H. Chen, J. D. Baerdemaeker, and F. Vervaeke, "Acoustic impulse response of apples for monitoring texture changes after harvest," 1992.
- [6] S. Schotte, N. D. Belie, and J. D. Baerdemaeker, "Acoustic impulse-response technique for evaluation and modelling of firmness of tomato fruit," *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 17, no. 2, pp. 105–115, 1999, doi: 10.1016/S0925-5214(99)00041-1.
- [7] N. Muramatsu, N. Sakurai, R. Yamamoto, and D. J. Nevins, "Nondestructive acoustic measurement of firmness for nectarines, apricots, plums, and tomatoes," *HortScience*, vol. 31, no. 7, pp. 1199–1202, 1996.
- [8] B. Diezma-Iglesias, C. Valero, F. J. García-Ramos, and M. Ruiz-Altisent, "Monitoring of firmness evolution of peaches during storage by combining acoustic and impact methods," *J. Food Eng.*, vol. 77, no. 4, pp. 926–935, 2006, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.08.021.
- [9] W. Zhang, D. Cui, and Y. Ying, "Nondestructive measurement of pear texture by acoustic vibration method," *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 96, pp. 99–105, 2014, doi: 10.1016/j.postharvbio.2014.05.006.
- [10] F. Khoshnam, S. R. B. H. Beygi, M. Namjoo, and M. Doroozi, "The effect of acoustic system variables on sound signals of Melon varieties," *J. Agric. Mach.*, 2015.
- [11] F. Khoshnam, M. Namjoo, and H. Golbakhshi, "Acoustic Testing for Melon Fruit Ripeness Evaluation during Different Stages of Ripening," *Agric. Conspec. Sci. Cus*, vol. 80, no. 4, pp. 197–204, 2015.
- [12] M. Taniwaki, M. Tohiro, and N. Sakurai, "Measurement of ripening speed and determination of the optimum ripeness of melons by a nondestructive acoustic vibration method," *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 56, no. 1, pp. 101–103, 2010, doi: 10.1016/j.postharvbio.2009.11.007.