




Hazelnut Sorting Using Acoustic Response

Seyed Salar Fakhroleslami¹  | Mohammad Aboonajmi²   | Seyed Reza Hassan-Beygi³ 

1. Dept of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: fakhroleslami.sa@ut.ac.ir
2. Dept of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: abonajmi@ut.ac.ir
3. Dept of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: rhbeigi@ut.ac.ir

Article Information:

Research Article

Received 13 Feb. 2025

Revised 26 April 2025

Accepted 11 May 2025

Keywords:

Acoustic,
Response,
Hazelnut,
Sorting System,
Non-destructive.

ABSTRACT

One of the efficient, cost-effective, and rapid methods for non-destructive quality evaluation of horticultural and agricultural products is the acoustic analysis response generated by impact. In this research, the possibility of using sound processing resulting from the collision of hazelnuts with a galvanized iron plate for separating large, medium, and small hazelnuts, as well as separating nutty and hollow types, has been investigated. First, hazelnuts were divided into four groups based on size: large, medium, small, and empty. The hazelnuts of each group were weighed to separate the nutty and hollow types from the composition. Based on this approach, a system was designed and developed using a single-impact method to generate sound from hazelnuts upon impact with an iron surface. Artificial intelligence techniques were employed to analyze and classify the product based on features extracted from their acoustic signals. Then, in order to take samples, all hazelnuts were dropped from a height of 35 and 45 cm and hit an iron plate. The sound of the collision was recorded by the microphone. The recorded data is taken from the time domain to the frequency domain by Fast Fourier Transform (FFT) and graded using the features obtained from the gradation. The results of audio tests show that by comparing the direct ratio of weight with amplitude and sound pressure level, a hazelnut has a pass range of less than 0.121Pa, and a sound pressure level of less than 75.2 dB is hollow or has an immature kernel. The study also revealed that the drop height did not significantly affect the quality classification, and a height of 35 cm, along with a sound pressure level above 75.2 dB, yielded the best results for hazelnuts classification. The results of this research, in combination with the common methods of separating hazelnuts, show that acoustic response analysis as a non-destructive method of grading hazelnuts can reduce their damage in addition to increasing the speed and accuracy of classification.

Cite this article: Fakhroleslami, S., Aboonajmi, M., & Hassan-Beygi, S. R. (2024). Hazelnut Sorting Using Acoustic Response. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 4 (1), 72-84.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2025.506345.1159>

Publisher: Iranian Society for Nondestructive Testing

درجه بندی فندق با استفاده از پاسخ صوتی

سید سالار فخرالاسلامی^۱، محمد ابونجمی^۲✉، سید رضا حسن بیگی^۳

۱- گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران، رایانامه: fakhroslami.sa@ut.ac.ir

۲- گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران، رایانامه: abonajmi@ut.ac.ir

۳- گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران، رایانامه: rhbeigi@ut.ac.ir

چکیده:

یکی از روش‌های مهم به صرفه و سریع برای ارزیابی غیر مخرب کیفی محصولات باغی و کشاورزی استفاده از تحلیل پاسخ صوتی حاصل از ضربه می‌باشد. در این پژوهش، امکان استفاده از پردازش صدای حاصل از برخورد فندق با صفحه آهنی گالوانیزه برای جداسازی فندق‌های درشت، متوسط، ریز و نیز جداسازی انواع مغز دار و پوک بررسی شده است. بر این اساس سامانه‌ای برمبنای روش تک ضربی برای تولید صدای فندق در اثر برخورد با سطح آهنی و استفاده از تکنیک‌های هوش مصنوعی برای تشخیص و طبقه بندی محصول براساس ویژگی‌های استخراج شده از سیگنال صوتی آنها طراحی و ساخته شد. ابتدا فندق‌ها براساس اندازه به سه گروه درشت، متوسط و ریز تقسیم شده سپس فندق‌های هر گروه وزن شده تا انواع مغزدار و پوک از یکدیگر تفکیک شوند. به منظور نمونه برداری، تمامی فندق‌ها از ارتفاع ۳۵ و ۴۵ سانتی‌متری رها شده تا با صفحه آهنی برخورد نمایند. سپس صدای برخورد حاصل از ضربه، توسط میکروفن با دقت بالا ضبط گردید. سیگنال‌های ضبط شده توسط تبدیل فوریه سریع (FFT) از حوزه زمان به حوزه فرکانس برده و با استفاده از ویژگی‌های بدست آمده درجه بندی می‌شوند. نتایج بررسی سیگنال‌های صوتی نشان می‌دهد با مقایسه رابطه مستقیم وزن با دامنه و تراز فشار صوت، فندقی که دارای دامنه کمتر از ۰/۱۲۱ پاسکال و تراز فشار صوت کمتر از ۷۵/۲ دسی بل باشد توخالی یا دارای مغز نارس می‌باشد. با بررسی صورت گرفته ارتفاع سقوط هیچ تفاوتی معنی داری در تشخیص درجه بندی کیفی نمونه نداشته لذا ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر و فشار صوت بالاتر از ۷۵/۲ بهترین نتیجه برای تشخیص فندق سالم و توپر را دارا می‌باشد. نتایج حاصل از این تحقیق در ترکیب با روش‌های متداول جداسازی فندق، نشان می‌دهد تحلیل پاسخ صوتی به عنوان یکی از روش‌های غیرمخرب درجه بندی فندق می‌تواند علاوه بر افزایش سرعت و دقت جداسازی، باعث کاهش آسیب دیدگی آنها نیز گردد.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۱۱/۲۵

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۲/۰۶

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۲/۲۱

کلیدواژه‌گان:

پاسخ صوتی،

سامانه درجه بندی،

فرکانس،

فندق،

غیر مخرب.

استناد: فخرالاسلامی، سید سالار؛ ابونجمی، محمد و حسن بیگی، سید رضا. (۱۴۰۳). درجه بندی فندق با استفاده از پاسخ صوتی. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۴ (۱)، ۸۴-۷۲.

© نویسندگان

ناشر: انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2025.506345.1159>

۱- مقدمه

از مشکلات ایران در صادرات محصولات کشاورزی، بسته بندی نامطلوب، درجه بندی نامناسب و رعایت نشدن استاندارد کیفی محصولات کشاورزی صادراتی و همچنین ناسازگاری کالاها با سلیقه مصرف کنندگان خارجی است. در نتیجه، ارزش افزوده حاصل از خدمات بازاریابی نصیب کشورهای واردکننده از ایران می‌گردد [۱]. فندق کاربرد وسیعی در تولید قهوه‌های طعم‌دار دارد و به عنوان یک ماده خام اصلی در صنایع شکلات، شیرینی و پخت نیز مصرف می‌شود که حدود ۸۰ درصد از کل مصرف فندق را تشکیل می‌دهد. نسبت وزن مغزخانه به وزن پوسته، تعیین کننده قیمتی است که باغدار دریافت می‌کند. فندق‌های توخالی و آن‌هایی که مغزشان رشد نکرده است، تاثیر منفی روی این نسبت دارند. برخی مواقع یک اختلال فیزیولوژیکی مانند استرس، از دست دادن آب و مواد مغذی، به پوسته اجازه می‌دهد بدون هسته رشد کنند. فندق‌های توپر و توخالی از لحاظ ظاهری شبیه به هم می‌باشند. در حال حاضر کشاورزان برای تفکیک انواع توپر و توخالی از فن هوا استفاده می‌کنند که با خطای زیادی همراه است [۲].

طبق آمار فائودر سال ۲۰۲۲ سطح زیر کشت فندق نزدیک یک میلیون هکتار و تولید، یک میلیون و دویست هزار تن می‌باشد، که کشور ایران با تولید ۱۳۴۰۶ تن در رتبه هفتم جهان قرار دارد. روش‌های سنتی جداسازی فندق‌های معیوب دست چین کردن و فندق‌های توخالی از پر استفاده از فن هوا است. در این روش فندق‌های معیوب، توسط کارگران شناسایی و از فندق‌های سالم جدا می‌شوند. اگرچه دست چین کردن فندق، از گذشته تا حال روشی کارا بوده است، لیکن به خاطر دخالت انسان، دارای سرعت پایین و خطای متغیر و زیاد است. با توجه به بررسی‌های عمل آمده هنوز پیشرفته ترین کارخانجات کشور از سیستم‌های مکانیکی جهت جداسازی فندق استفاده می‌کنند. سیستم ماشین بینایی نیز برای جداسازی فندق‌ها پیشنهاد شده است. این سیستم‌ها به دلیل نیاز به دوربین‌های با رزولوشن بالا، نورپردازی و نرم افزارهای پردازش تصویر نسبت به آزمون پاسخ صوتی گران قیمت بوده و دقت جداسازی آنها مشابه سیستم‌های مکانیکی است.

آزمون‌های تحلیل پاسخ صوتی به عنوان یکی از روش‌های غیرمخرب کیفیت سنجی، از فنون جدید برای تعیین ویژگی‌های محصولات کشاورزی است. توسعه آزمون‌های آکوستیک در صنعت کشاورزی به سرعت فراگیر شده و در اکثر شاخه‌های کشاورزی مخصوصاً درجه بندی و تعیین کیفیت محصولات کشاورزی و باغی به نوعی وارد شده است که دارای دقت و سرعت بیشتر در درجه بندی محصولات کشاورزی می‌باشد و می‌تواند جایگزین مناسب برای درجه بندی محصولات کشاورزی از جمله مغزخانه‌ها نسبت به روش‌های ذکر شده باشد [۳]. آزمون پاسخ صوتی به سه روش؛ عبور پالس صوتی از محصول، برخورد محصول با سطح و برخورد آونگ با محصول انجام میشود که در این پژوهش، برخورد محصول با سطح آهنی مورد توجه می‌باشد. صدقی و محمودی سامانه ای برای جداسازی بر خط ارقام بادام طراحی کردند که سیگنال‌های صوتی حاصل از برخورد بادام با یک صفحه فولادی، توسط میکروفون دریافت و پس از پردازش سیگنال‌ها در حوزه زمان با تبدیل فوریه سریع در حوزه فرکانس استخراج می‌گردد. در کلیه آزمایش‌ها از شبکه عصبی نوع پرسپترون چند لایه (MLP) با الگوریتم پس از انتشار خطا و تابع یادگیری LLM استفاده گردید. میزان دقت طبقه بندی برون خط به طور میانگین ۹۶/۲ درصد بوده که این میزان در حالت برخط به ۸۸ درصد کاهش یافته بود [۴]. سجادی برای تشخیص و جداسازی گندم‌های سالم با آفت زده، دانه‌های گندم را از ارتفاع ۲۵ سانتی متری با یک صفحه فولادی با ضخامت زیاد برخورد کرده و صدای برخورد توسط یک میکروفون به رایانه منتقل گردد. پس از پردازش سیگنال‌های صدای برخورد گندم، با استفاده تبدیل گسسته موجک پردازش و مشخصات پردازش شده به عنوان ورودی شبکه عصبی مصنوعی استفاده شدند. شبکه عصبی مصنوعی با ساختار ۲-۶-۱۰ قادر به جداسازی دانه‌های گندم سالم و آفت زده به ترتیب با دقت ۹۸ و ۹۳ درصد می‌باشد [۵]. دمانه و همکاران به شبیه سازی صدای گاز گرفتن و رابطه آن با سختی و طراوت سیب به کمک آزمون صوتی پرداختند در این تحقیق آنها سه رقم را مورد ارزیابی قرار دادند؛ و به این نتیجه رسیدند که با کاهش صدای دریافتی حین گاز گرفتن کیفیت محصول نیز در

بیولوژیکی و رفتار ارتعاشی میوه در اثر اعمال ضربه و تحلیل صوت خروجی از محصول صدای بازخورد را به عنوان شاخصی برای تشخیص بلوغ میوه در نظر گرفته اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که پارامترهای BM (اندازه باند) به دست آمده توسط جمع بزرگی از طیف نرمال بین دو فرکانس معین، بهترین شاخص در ارتباط با کیفیت داخلی بودند، به خصوص BM بین محدود ۸۵ و ۱۶۰ هرتز (BM) که نشان دهنده حداقل همپوشانی بین هندوانه سالم و توخالی است [۱۱]. محمودی و همکاران جهت جداسازی فندق‌های درشت، متوسط و ریزو نیز جداسازی انواع مغزدار و پوک، تمامی دلنه‌ها را از ارتفاع ۴۰ و ۵۰ سانتیمتری به منظور نمونه برداری رها کردند و صدای برخورد حاصل از دانه با صفحه فلزی توسط میکروفون ضبط گردید. سیگنال‌های بدست آمده در حوزه موجک گسسته پردازش شده و مشخصات بدست آمده، به عنوان ورودی شبکه عصبی مصنوعی بکار گرفته شدند. شبکه عصبی با ۳ و ۹ نورون در لایه پنهان، به ترتیب توانستند فندق‌هایی که از ارتفاع ۴۰ و ۵۰ سانتی متری رها شده بودند را با دقت ۱۰۰ درصد از یکدیگر تفکیک کنند. همچنین فندق‌های مغزدار و پوک گروه درشت، متوسط و ریز به طور جداگانه به ترتیب با دقت‌های ۱۰۰، ۹۹/۱۶ و ۹۸ درصد برای ارتفاع ۴۰ سانتیمتری و ۱۰۰، ۹۹/۶۶ و ۹۷/۵ درصد برای ارتفاع ۵۰ سانتی متری جدا گردیدند [۱۲].

در این پژوهش از استفاده از روش پاسخ صوتی و تحلیل داده‌های صوتی در حوزه زمان و فرکانس و استخراج ویژگی‌های مناسب (دامنه فرکانس تشدید، فرکانس تشدید و تراز فشار صوت)، به طبقه بندی انواع فندق‌های درشت، متوسط، ریز و پوک پرداخته و ارتفاع رها سازی بهینه و همچنین بهترین زاویه صفحه تغذیه نسبت به افق مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ آماده سازی نمونه‌ها

ابتدا نمونه فندق‌های تهیه شده از مناطق اشکوارت استان گیلان، براساس اندازه به چهار گروه درشت، ریز، متوسط و پوک تقسیم شدند. فندق‌های هر گروه وزن شدند

سطح پایینی قرار داشته و نهایتاً رابطه ی مستقیم بین صدا و استحکام بافت سیب به دست آوردند [۶]. خالصی و همکاران در پژوهش خود به تشخیص انواع گردو با استفاده از آکوستیک ضربه و شبکه‌های عصبی مصنوعی پرداختند و یک سیستم جداسازی بر اساس ترکیبی از تشخیص صدا و شبکه‌های عصبی مصنوعی برای طبقه‌بندی دو ژئوتیپ گردو ایرانی طراحی نمودند که بر اساس نتایج این روش دارای دقت بالای بود است [۷].

گرایمی و همکاران به تحلیل پاسخ ضربه آکوستیک در تشخیص بافت سیب‌های تحت آزمون با پالس میدان الکتریکی پرداخته و به این نتیجه رسیدند که بهتر است شاخص جداسازی میوه سیب به صورت آکوستیک اندازه گیری شود زیرا این روش برای مشخص کردن مشخصه میزان خسارت مناسب است و نسبت به شاخص تخریب هدایت به طور عمومی تر 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 PEF (میدان الکتریکی پالسی) نیز می‌تواند به شکل نمونه و جهت گیری فضایی آنها بستگی داشته باشند [۸]. سجادی و غضنفری با استفاده از تبدیل موجک انعکاس صدا و شبکه‌های عصبی به درجه بندی پسته در دو بخش آفلاین و روی خط با طراحی سامانه‌ای در بخش روی خط متشکل از یک صفحه حاوی صدا بر که پسته از ارتفاع مشخص روی آن انداخته می‌شود صدای حاصله توسط میکروفون دریافت و به بخش پردازش فرستاده می‌شود آنها توانستند پسته پوک را با دقت ۹۸ درصد و پسته مغز دار را با دقت ۹۴ درصد جداسازی کنند [۹]. رستمی و همکاران پسته‌های پوک و مغزدار را با استفاده از پردازش صدا، در دو حوزه زمان و فرکانس تفکیک کردند. در این جداسازی، دقت ۹۸/۷۵ درصد برای تشخیص پسته‌های درشت پوک و ۸۲/۵۰ درصد برای تشخیص پسته‌های درشت مغزدار بدست آمد. نتایج بدست آمده از دقت تشخیص، برای گروه‌های دیگر نیز نسبتاً مناسب بود. حداقل دقت جداسازی برای دانه‌های متوسط مغزدار، معادل ۶۲/۷۵ درصد بدست آمد [۱۰]. دیزما و همکاران به تشخیص کیفیت داخلی هندوانه بدون هسته با پاسخ ضربه آکوستیک پرداختند. در این پژوهش آنها با زیر نظر گرفتن یافت



شکل ۲) مدل سیستم تغذیه

۲-۴ طراحی سامانه صوتی (آکوستیک)

قطعات تشکیل دهنده این سامانه شامل صفحه برخورد، میکروفن، محفظه آکوستیک، سیم رابط، کارت صوتی و کامپیوتر شخصی است. برای حصول دقت بیشتر در طبقه بندی محصول باید صداهای اضافی محیط حذف شود. صفحه برخورد باید جرم بیشتری نسبت به فندق داشته باشد تا در هنگام برخورد فندق ارتعاش کمتری به صفحه وارد شود [۱۳]. این ارتعاش ممکن است در تشخیص سیگنال های صوتی توسط سامانه، باعث ایجاد خطا شود. بر طبق این نظریه از یک صفحه آهنی گالوانیزه به ضخامت ۲ میلی متر و به ابعاد ۲۳۰×۲۳۰ میلی متر به عنوان صفحه برخورد فندق استفاده شد. به ازای هر نمونه از فندق یک سیگنال صوتی لازم خواهد بود بنابراین شیب صفحه آهنی طوری تنظیم گردید تا فندق فقط یکبار با صفحه برخورد داشته باشد. وظیفه میکروفن حس کردن و انتقال سیگنال صوتی حاصل از برخورد فندق به سطح آهنی به قسمت پردازش اولیه است. برای حذف نویز و صداهای محیط اتاقی مناسب برای قرارگیری میکروفن از جنس چوب با ابعاد ۲۳۰×۲۳۰×۴۰ میلی متر ساخته شد. برای عایق سازی دیواره های آن از پارچه نمد و سپس از فوم شانه تخم مرغی به ضخامت ۴۰ میلی متر بکار گرفته شد. میکروفن در فاصله ۳۵ میلی متری از صفحه برخورد شیب دار تعبیه شد تا

تا انواع مغزدار و پوک از یکدیگر تفکیک شوند. گروه درشت (دوگرم به بالا و قطر ۲۰ میلی متر)، متوسط (۱/۵ الی ۲ گرم و قطر ۱۵ میلی متر)، دسته ریز (۱/۵ گرم به پایین ۱۰ میلی متر)، پوک (۱/۷ گرم و قطر ۲۰ میلی متر) تقسیم بندی شدند (شکل ۱).



شکل ۱) تصویر نمونه فندق از هر گروه

۲-۲ شرح دستگاه

این سامانه بر مبنای روش تک ضربه ای برای تولید صدای فندق در اثر برخورد با سطح آهنی و استفاده از تکنیک های هوش مصنوعی برای تشخیص و طبقه بندی محصول بر اساس ویژگی های استخراج شده از سیگنال صوتی آنها عمل می کند. در حالت کلی سامانه از دو واحد نرم افزاری و سخت افزاری تشکیل شده است.

۲-۳ طراحی و ساخت سامانه تغذیه

در سامانه های درجه بندی آکوستیکی از آنجایی که باید دانه ها به صورت تک به تک آنالیز و پردازش شوند، سامانه تغذیه باید قابلیت انتقال نمونه ها به صورت تک به تک را داشته باشد، که مطابق شکل ۲ از یک صفحه تغذیه (نبشی)، پیچ های تنظیم ارتفاع (۳۵ و ۴۵ سانتی متر) و شیب (۶۰ درجه نسبت به افق)، میله متحرک و پایه نگهدارنده تشکیل شده است.

به وسیله میکروفن اخذ می‌شوند، امری ضروری است که قبل از هر آزمون صوتی باید صورت پذیرد تا از صحت سیگنال‌های دریافتی توسط میکروفن اطمینان حاصل گردد. برای محاسبه ارزش نرمال شده یا ضریب نرمالیزاسیون با استفاده از سیگنال ضبط شده از کالیبراتور بیشترین و کمترین مقدار دامنه سیگنال در حوزه زمان استخراج می‌شود و از فرمول زیر این ضریب استخراج می‌گردد.

$$NC = \frac{\text{abs}(\max(c)) + \text{abs}(\min(c))}{2} \quad (1)$$

در این رابطه NC ضریب نرمالیزاسیون و c مقادیر عددی به دست آمده از تبدیل فایل سیگنال با فرمت wav به فرمت txt است. در مرحله پردازش سیگنال‌های نهایی این پژوهش باید تمامی مقادیر سیگنال بر این ضریب تقسیم شوند تا مقادیر نرمال شده برای مراحل بعدی پردازش در اختیار باشد.

۲-۷ پردازش سیگنال

در بحث پردازش سیگنال دو ویژگی فرکانس و زمان از اهمیت بالای برخوردارند بنابراین روش‌های پردازش سیگنال بر اساس این دو ویژگی به سه بخش: روش‌های حوزه زمان، روش‌های حوزه فرکانس و روش‌های حوزه زمان-فرکانس تقسیم می‌شوند.

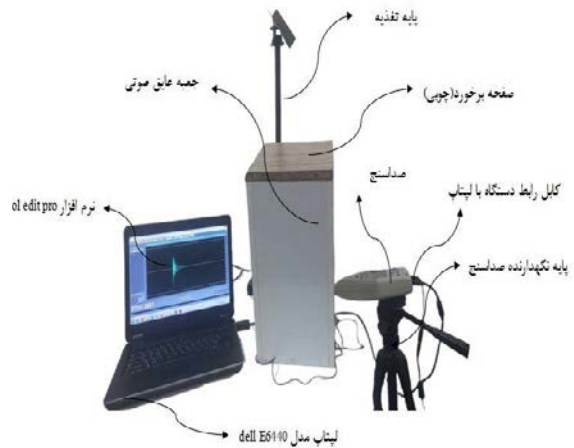
۲-۸. روش‌های حوزه زمان

در این روش‌ها از خود داده‌های زمانی به منظور تحلیل استفاده می‌شود و هیچ گونه تبدیل دیگری داده‌ها اعمال نمی‌شود در این روش‌ها عموماً از ویژگی‌های آماری سیگنال زمانی استفاده می‌شود.

روش‌های حوزه فرکانس

در بررسی رفتار یک سیگنال در حوزه زمان تنها اطلاعات محدودی از آن استخراج می‌شود و بسیاری از مشخصات مهم آن پنهان می‌ماند؛ بنابراین برای آشکارسازی این مشخصات، سیگنال از حوزه زمان به حوزه فرکانس انتقال داده می‌شود تا در آن جا اطلاعات جدید نمایان گردد برای

انعکاس صدای برخورد فندق با صفحه را به رایانه منتقل کند. رایانه مورد استفاده در این پژوهش مدل Dell E6440 با پردازنده ۲.۷۱GHz و حافظه موقت ۴ گیگابایتی می‌باشد.



شکل ۳) سامانه طراحی شده درجه بندی فندق

پس از حس کردن صدای برخورد فندق با صفحه آهنی توسط میکروفن و انتقال سیگنال‌های صوتی به کارت صدای کامپیوتر، بخش نرم افزاری سامانه به ترتیب زیر می‌باشد: پردازش سیگنال (شامل عملیات تبدیل آنالوک به دیجیتال، فیلتر کردن و نرمال کردن)، استخراج ویژگی‌های سیگنال، اعمال ویژگی‌های سیگنال به سامانه درجه بندی عنوان ورودی به شبکه عصبی مصنوعی و آموزش و ارزیابی شبکه بر مبنای تطابق و هم‌سنجی بین ورودی و هدف تشخیص یعنی نوع کلاس فندق (درشت، متوسط، ریز و پوک).

۲-۵ ضبط و ذخیره سازی سیگنال‌ها

برای ضبط و ذخیره سیگنال‌ها از نرم افزار Cool edit pro 2.0 با نرخ نمونه برداری ۴۸۰۰۰ هرتز و ۱۶ بیت استفاده شد و با فرمت txt ذخیره شد. این نرم افزار دارای کاربری آسان در عین حال کاربردی است، که امکان ذخیره سیگنال با قالب متنی و همچنین مشاهده و برش دادن سیگنال را فراهم می‌سازد.

۲-۶ نرمالیزه کردن داده‌ها

اتصال دستگاه صداسنج با کابل رابط به ورودی کارت صدای رایانه قابل حمل و گرفتن سیگنال کالیبره به منظور نرمالیزه کردن سیگنال‌هایی که در ادامه کار

$$G(f) = \frac{1}{T} \int g(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (2)$$

تبدیل فوریه سریع

در عمل سیگنال زمانی که به وسیله تجهیزات الکترونیکی ثبت شده است جهت پردازش به صورت گسسته نمونه برداری می‌شود. اگر سیگنال گسسته باشد، تبدیل فوریه آن نیز گسسته خواهد بود و انتگرال آن تبدیل به یک سری خواهد شد. در این حالت تبدیل فوریه به صورت رابطه (۳) قابل بیان خواهد بود.

$$G(F_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} g(t_n) e^{-j2\pi F_k t_n} \quad (3)$$

در رابطه فوق k یک عدد و $F_k = \frac{k}{N}$ بیانگر فرکانس و N تعداد تقسیمات یک سیگنال است. تبدیل فوریه سریع FFT کاربرد همان مفاهیم تبدیل فوریه معمولی را دارد. در این حالت تعداد نمونه برداری‌ها به صورت توانی از دو به صورت 2^N انتخاب شده و تبدیل فوریه یا الگوریتم خاصی محاسبه می‌گردد که حجم محاسبات را به شدت کاهش می‌دهد در نتیجه سرعت پردازش افزایش می‌یابد [۱۳]. سیگنال‌های ضبط‌شده در حوزه زمان برای تعیین ویژگی صوتی مناسب نیست و برای تشخیص اندازه و پوک بودن نمونه‌ها باید سیگنال از حوزه زمان به حوزه فرکانس انتقال داده شوند. برای انتقال سیگنال‌ها از حوزه زمان به حوزه فرکانس مراحل زیر انجام شده و مقادیر مورد نیاز محاسبه می‌شود.

۱- اندازه‌گیری مقدار نویز اولیه

به منظور اندازه‌گیری مقدار نویز اولیه و محاسبه نسبت سیگنال به نویز (S/N) سیگنالی به طول ۳۰۰ میلی‌ثانیه با نرم افزار کول‌ادیت ضبط گردید و با محاسبه بیشترین دامنه فشار صوت این طیف سیگنال در حوزه فرکانس و بیشترین دامنه فشار صوت سیگنال ضربه، نسبت سیگنال به نویز از رابطه (۴) محاسبه گردید.

این کار از تبدیل فوریه پیوسته و گسسته استفاده می‌شود. همچنین به منظور افزایش سرعت محاسبات تبدیل فوریه سریع معرفی می‌گردد که با اهمیت‌ترین ابزار در پردازش و تحلیل سیگنال‌ها است.

۱۰-۲ روش‌های زمان-فرکانس

از اشکالات اصلی در همه روش‌های حوزه زمان و فرکانس این است که سیگنال مورد بررسی را پایا در نظر گرفته و محتوای فرکانس نسبت به زمان ثابت می‌گیرند در حالی که در اکثر کاربردهای عملی سیگنال‌ها غیر پایا بوده و محتوای فرکانسی با زمان تغییر می‌کند. از این رو روش‌های جدیدی برای برطرف کردن این کاستی ارائه گردیده است. از مهمترین این روش‌ها تبدیل فوریه زمان کوتاه^۱ و تبدیل موجک^۲ است. در تبدیل فوریه پیوسته و گسسته بخشی از سیگنال در نظر گرفته می‌شود و محتوای فرکانسی آن به تمام سیگنال تعمیم داده می‌شود.

تبدیل فوریه

دسته بزرگی از سیگنال‌ها، شامل تمام سیگنال‌های دارای انرژی محدود را می‌توان به صورت یک ترکیب خطی از نمایی‌ها مختلط نمایش داد. در سیگنال‌های متناوب نمایی‌ها مختلطی که به عنوان پایه نمایش به کار می‌روند، هماهنگ هستند. برای سیگنال‌های نامتناوب بی‌نهایت فرکانس بی‌نهایت نزدیک به هم وجود دارد و نمایش ترکیب خطی براساس این نمایی‌ها شکل انتگرال به خود می‌گیرد. طیف ضرایب این نمایش را تبدیل فوریه می‌نامند. تبدیل فوریه وظیفه تبدیل سیگنالی از حوزه زمان به حوزه فرکانس را انجام می‌دهد. اساس کار در تبدیل فوریه، تبدیل یک سیگنال به مجموعه‌ای نامحدود از توابع تناوبی \sin و \cos است. اگر $g(t)$ یک سیگنال حوزه زمان در بازه زمانی صفر تا T باشد تبدیل فوریه یا تبدیل آن از حوزه فرکانس از نظر ریاضی با انتگرال زیر (رابطه ۲) انجام می‌گیرد [۱۳].

² Wavelet Transform (WT)

¹ Short Time Fourier Transforms (STFT)

در این رابطه هدف انتخاب نقاط داده از کل سیگنال اولیه است تا بتوان براساس آن توان FFT لازم را بدست آورد. در اینجا F_s سرعت نمونه برداری است و t زمان انتخاب شده در مرحله انجام آزمون ها می‌باشد. N باید عددی باشد که ۲ بتوان آن برسد نزدیک ترین مقدار را به تعداد نقاط داده (DataPoints) داشته باشد تا تبدیل سریع فوریه (FFT) بتواند سیگنالی با بیشترین دقت بازسازی کند. براساس سیگنال اولیه که بدست آمده است معمولا متلب یک توان بیشتر از n در نظر می‌گیرد تا داده‌ای از سیگنال حذف نشود و مقادیر کمبود را باصفر جایگزین می‌کند.

۳- محاسبه گام زمانی برای یک سیکل از سیگنال.

$$t_0 = \frac{1}{F_s} = \frac{1}{48000} = 2.083 \times 10^{-5} \quad (6)$$

محاسبه فرکانس پایه

برای محاسبه حداکثر و اولین فرکانس یافرکانس پایه سیگنال‌ها از روابط زیر استفاده می‌شود.

$$F_{max} = \frac{N}{2} \times \frac{1}{TR} N = F_s \times TR$$

$$= 48000 \times \frac{0.3}{2} \times \frac{1}{0.3} = 24000 \text{ Hz} \quad (7)$$

$$F_{min} = \frac{1}{TR} \frac{1}{0.3} = 3.33 \text{ Hz}$$

$$F_0 = \frac{F_{max}}{FFT} = \frac{24000}{8192} = 2.93 \text{ Hz}$$

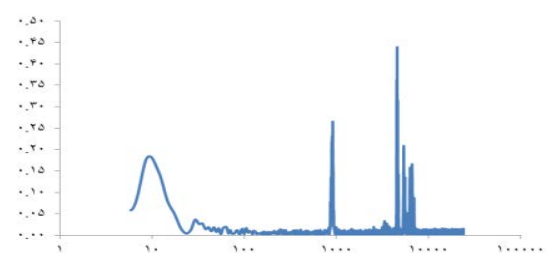
که TR طول بازه زمانی (میلی ثانیه) و F_s سرعت نمونه برداری (هرتز) سیگنال است. F_0 فرکانس پایه (هرتز) است که FFT به ما می‌دهد. پس از مراحل بالا با استفاده از کدهای نوشته شده در نرم‌افزار متلب ویژگی‌های فرکانس تشدید، دامنه فرکانس تشدید و تراز فشار صوت را برای طبقه بندی فندق‌های درشت، متوسط، ریز و پوک انتخاب می‌کنیم.



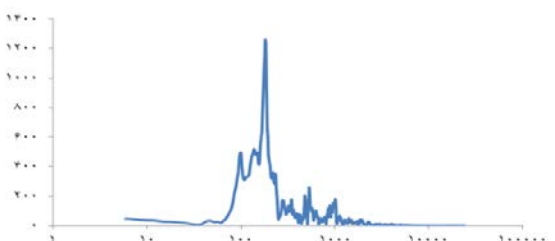
شکل (۴) طیف سیگنال نویز در حوزه زمان



شکل (۵) طیف سیگنال ضربه در حوزه زمان



شکل (۶) طیف سیگنال نویز در حوزه فرکانس



شکل (۷) طیف سیگنال ضربه در حوزه فرکانس

$$\frac{S}{N} = \frac{P_{signal}}{P_{noise}} = \frac{1261}{0.436} = 2892 \quad (4)$$

باتوجه به عدد به دست آمده برای نسبت سیگنال نویز (۲۸۹۲:۱) می‌توان از نویز موجود در سیگنال‌های به دست آمده از آزمون صوتی چشم پوشی کرد.

۲- انتخاب تعداد نقاط داده و توان FFT

$$\begin{aligned} \text{Data Points} &= F_s \times t \\ &= 48000 \times 0.300 = 1440 \quad (5) \\ \text{Power FFT} &= 2^n = 2^{13} = 8192 \end{aligned}$$

۳- نتایج و بحث

۲-۳ انتخاب دامنه فرکانس به عنوان شاخص صوتی تفکیک کننده فندق‌ها

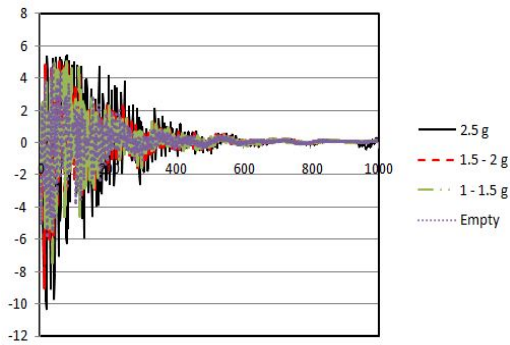
۳-۱ بررسی پارامترهای ارتفاع رهاسازی و جهت رهاسازی برای درجه بندی فندق

از میان صفات صوتی به دست آمده از آزمون صوتی تنها دامنه فرکانس در مقایسه کلی با دیگر صفات تمامی شرایط لازم برای گزینش به عنوان عامل تشخیص صوتی نهایی را برآورد کرد. همچنین درک انسان از تفاوت قائل شدن بین دو سیگنال صدا بر مبنای فرکانس بوده و فرآیندهای فیزیکی انتشار، انتقال و محتوای انرژی سیگنال به فرکانس آن بستگی دارد [۱۵]. در روش آزمون صوتی، میوه توسط ضربه چکش، آونگ یا برخورد آن با صفحه تحریک شده و سیگنال صوتی توسط صدا سنج، میکروفن و یا یک حسگر پیزوالکتریک انعطاف پذیر دریافت می‌شود. سپس با استفاده از تحلیل الگوریتم تبدیل فوریه سریع فرکانس تشدید استخراج می‌شود. این روش برای اندازه‌گیری خصوصیات میوه‌های غیرکروی تعمیم یافته‌است در پژوهشی که برای تشخیص پسته پوک از مغزدار با استفاده از پردازش انعکاس صدای برخورد در دو حوزه زمان و فرکانس صورت گرفت اعلام داشتند که فرکانس و دامنه فرکانس می‌تواند عامل تمایز دو سیگنال صوتی از یکدیگر باشد که می‌تواند تصدیق کننده انتخاب فرکانس و دامنه فرکانس به عنوان عامل تشخیص برای درجه بندی فندق‌ها باشد [۱۷].

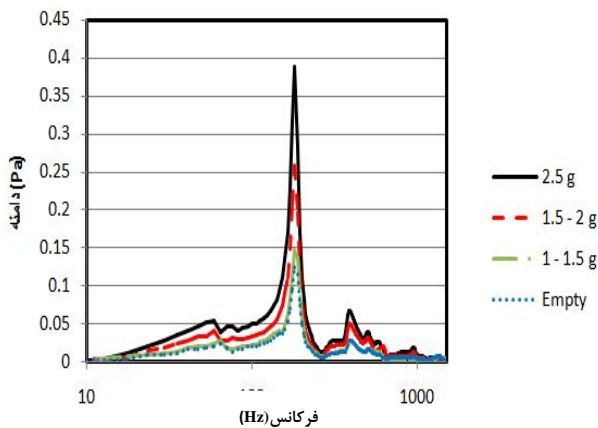
اوناران و همکاران پژوهشی برای جداسازی فندق‌های سالم و پوک انجام دادند و سیگنال حاصل از برخورد فندق با سطح فولادی را ضبط و تجزیه تحلیل کردند و دریافتند که ویژگی‌های مبتنی بر فرکانس دقت بالاتری برای تشخیص نمونه‌ها دارد [۲]. همچنین البتاوی در پژوهش خود در مورد تشخیص حفره درونی سیب زمینی با تحلیل پاسخ صوتی از برخورد سیب‌زمینی از روی یک ریل به داخل مخزن و دریافت صدای برخورد بیان داشته است که سیب‌زمینی سالم از حفره دار با اختلاف فرکانسی تشدید ۲۳۰ هرتز قابل تفکیک است [۱۴].

دو پارامتر بسیار حائز اهمیت برای مطالعه پارامترهای صوتی؛ اثر ارتفاع رهاسازی و بخصوص جهت رهاسازی است، زیرا که تاثیر گذاری این دو پارامتر موجب سلب اطمینان از انتخاب روش تحلیل صوتی در تفکیک فندق‌ها می‌گردد. چنانچه پارامتر تشخیص صوتی به دست آمده از آزمون صوتی تحت تاثیر هر کدام از این دو پارامتر قرار بگیرند پارامتر مناسبی برای انتخاب نهایی به عنوان پارامتر صوتی درجه بندی نخواهد بود. به عبارت دیگر اگر هر کدام از پارامترهای صوتی استخراج شده از سیگنال نسبت به جهت برخورد فندق با صفحه برخورد تحت تاثیر قرار گیرند اعتبار خود را به عنوان پارامتر صوتی تشخیص از دست می‌دهند.

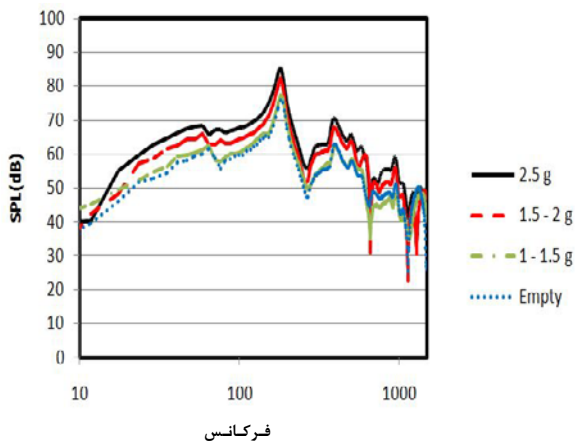
انتخاب مناسب‌ترین سطح ارتفاع رهاسازی از میان سطوح ارتفاعی ۳۵ و ۴۵ سانتی‌متری یکی از اهداف این پژوهش بود که با استفاده از آن علاوه بر افزایش قدرت تشخیص پارامتر صوتی نهایی کمترین آسیب مکانیکی به محصول وارد شود. نتایج نشان داد که عامل ارتفاع رهاسازی در سطوح رهاسازی ۳۵ و ۴۵ سانتی‌متری در هیچ یک از صفات صوتی به دست آمده اثر قابل توجهی نداشته‌است. جهت رهاسازی نیز اثر معناداری روی صفات صوتی نداشته‌است که با نتایج تحقیق البتاوی بر روی درجه بندی سیب زمینی با کمک تحلیل پاسخ صوتی مطابقت دارد [۱۴]. وی اعلام داشته جهت رهاسازی تأثیری بر نتایج آزمون صوتی نداشته که همچنین با نتایج آزمون صورت گرفته توسط چن و همکاران مطابقت دارد [۱۵]. چن و همکاران اعلام داشتند که محل ضربه، نحوه نگه داشتن سیب اثری روی فرکانس نداشته و تنها کمی بر روی دامنه فرکانس موثر است که در این پژوهش برای بررسی جهت رهاسازی فندق به دلیل کروی نبودن، هر فندق با چهار تکرار مورد آزمایش قرار گرفته و نتیجه نهایی گزارش شده‌است.



شکل ۸) نمونه ای از سیگنال اولیه حاصل از فندق های رها شده از ارتفاع ۳۵ سانتی متری



شکل ۹) مقایسه نمودار فرکانس-دامنه چهار گروه



شکل ۱۰) مقایسه نمودار فرکانس-SPL چهار گروه

۳-۳ بررسی ارتفاع‌های ۳۵ و ۴۵ سانتی‌متری برای جداسازی فندق‌ها

الف) ارتفاع رهاسازی ۳۵ سانتی متری

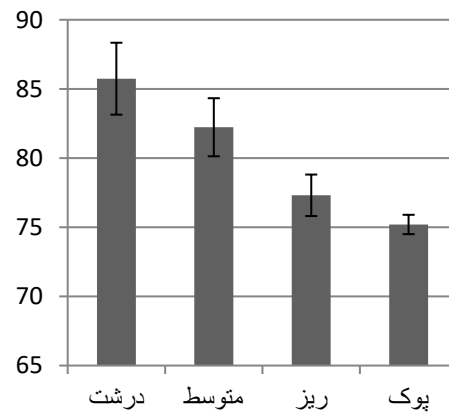
تعداد ۱۶۰ نمونه فندق مورد آزمایش قرار گرفت و با توجه به تجزیه تحلیل نمودارها این نتیجه گرفته شد که فرکانس برای همه گروه‌های فندق یکسان بوده و تفاوت فقط در دامنه فرکانس برای گروه‌های مختلف است، طوری که مقدار فرکانس در ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر برای همه گروه‌ها ۱۸۱/۶۴ هرتز بود. دلیل یکسان بودن فرکانس تشدید برای گروه‌های مختلف می‌تواند به علت خواص ماده تشکیل دهنده فندق مانند مدول الاستیسیته، چگالی، توزیع جرم و سختی و همچنین نسبت ابعاد هندسی و حالت‌های ارتعاشی خاص باشد.

متوسط دامنه فشارصوت در گروه‌های درشت، متوسط، ریز و پوک به ترتیب ۰/۳۸۷، ۰/۲۵۰، ۰/۱۴۸ و ۰/۱۲۱ پاسکال بدست آمد. با توجه به کم شدن جرم فندق دامنه نیر کوتاه‌تر می‌شود که با تحقیق انجام شده توسط محمودی و همکاران برای درجه بندی بادام‌های سنگی، نیمه سنگی و کاغذی، مطابقت دارد. وی اشاره کرده که طیف‌های بادام سنگی و نیمه سنگی به دلیل نزدیک بودن جرم و سختی پوسته به یکدیگر کاملاً بر هم منطبق‌اند ولی بادام کاغذی با داشتن جرم کم و پوست نازک دامنه کوتاه‌تری دارد [۱۸]. میانگین تراز فشارصوت (SPL) به ترتیب برابر با: ۸۵/۷۴، ۸۲/۲۳، ۷۷/۳۱ و ۷۵/۲ دسی‌بل است. از مطالبی که بیان شد می‌توان نتیجه گرفت که در هر تکرار، فرکانس در گروه‌ها ثابت است و تنها دامنه و تراز فشارصوت عامل تقسیم‌بندی این گروه‌ها است (محور افقی نمودارهای حوزه فرکانس لگاریتمی می‌باشد).

در دامنه فرکانس و تراز فشار صوت است، مطابقت دارد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش با مقایسه پاسخ سیگنال‌های حاصل از برخورد فندق در گروه‌های وزنی متفاوت با صفحه آهنی، به بررسی دامنه فرکانس تشدید و تراز فشار صوت پرداخته و توانستیم فندق‌ها را با ویژگی‌های دامنه فرکانس تشدید، فرکانس تشدید و تراز فشار صوت در گروه‌های وزنی مختلف درجه بندی و همچنین رابطه مستقیم وزن با دامنه فرکانس تشدید و تراز فشار صوت را به دست آوریم.



شکل (۱۱) نمودار میانگین SPL بر حسب دسی بل

ب) ارتفاع رهاسازی ۴۵ سانتی متری

از ارتفاع ۴۵ سانتی متری نیز از هر گروه ۵۰ عدد فندق روی صفحه شیبدار قرار گرفت تا مورد آزمایش قرار گیرد. طبق نتایج به دست آمده فرکانس تشدید بدست آمده برای همه گروه‌های فندق‌ها ۲۰۵ هرتز می‌باشد که دارای دامنه و تراز فشار صوت متفاوت برای هر گروه است. میانگین دامنه برای گروه‌های درشت، متوسط، ریز و پوک به ترتیب برابر: ۰/۳۸۳، ۰/۲۲۵، ۰/۱۹۲ و ۰/۱۸۳ می‌باشد و متوسط تراز فشار صوت برابر: ۷۸/۲۲، ۸۲/۱۵، ۸۵/۶۶ و ۷۶/۶۶ می‌باشد که با توجه به نتایج بالا می‌توان نتیجه گرفت که در فرکانس تشدید دیگر میانگین دامنه و تراز فشار صوت با ارتفاع رهاسازی ۳۵ سانتی متری تقریباً برابر است و تاثیر چندانی در وضوح تشخیص طبقه بندی ندارد و از طرفی با توجه به این که ارتفاع ۳۵ سانتی متری اثر مخرب کمتری نسبت به ارتفاع رهاسازی ۴۵ سانتی متری دارد ارتفاع ۳۵ سانتی متری به عنوان ارتفاع بهینه انتخاب می‌شود.

جعفری و همکاران تحقیقی برای جداسازی فندق‌های پر و پوک در اندازه‌های مختلف انجام دادند. در این پژوهش با استفاده از ارزیابی سیگنال‌های صوتی موجک و پردازش رایانه ای انعکاس صوت فندق‌های پوک و مغزدار از یکدیگر تمایز داده شدند [۱۹]. پس از مشاهده و مقایسه نتایج حاصل از تشخیص فندق‌های رها شده از دو ارتفاع ۴۰ و ۵۰ سانتی متری مشخص شد که اختلاف معناداری در دو ارتفاع استفاده شده در این پژوهش، وجود ندارد. این پژوهش، با نتایج بالا که نشان دهنده معنی دار نبودن ارتفاع رهاسازی

نتایج تحلیل سیگنال‌های بدست آمده نشان می‌دهد فندق‌های پوک گروه درشت با قطر ۲۰ میلی متری و وزن ۱/۷ گرمی، دارای دامنه ای با میانگین ۰/۱۲۱ پاسکال و تراز فشار صوت ۷۵/۲ دسی بل است که کمترین دامنه و تراز فشار صوت بین گروه‌های دیگر دارد. فندق‌های پوک بقیه گروه‌ها وزنی کمتر از فندق‌های پوک گروه درشت داشته و با توجه به رابطه مستقیم وزن با دامنه و تراز فشار صوت، می‌توانیم به این نتیجه برسیم که فندق‌های که دارای دامنه کمتر از ۰/۱۲۱ پاسکال و تراز فشار صوت کمتر از ۷۵/۲ دسی بل باشد توخالی یا دارای مغز نارس است.

با مقایسه نتایج حاصل از تشخیص فندق‌های رها شده در دو ارتفاع ۳۵ و ۴۵ سانتی متری مشخص شد که اختلاف معناداری در دو ارتفاع استفاده شده در این پژوهش وجود ندارد. همچنین در ارتفاع ۳۵ سانتی متری، سطوح جرم توخالی، ۱ - ۱/۵ گرم، ۱/۵ - ۲ گرم و ۲/۵ گرم به بالا بر فرکانس تشدید اثر معنی داری نداشت.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد روش آزمون غیر مخرب پاسخ صوتی روشی به صرفه، تکرار پذیر، سریع و دارای کاربری آسان است که نسبت به روش‌های سنتی و مکانیکی دارای بازدهی بالا و کمترین اثر مخرب بر روی محصول می‌باشد.

۵- منابع

[1] Aghil, H., Yousefzadeh, S., & Mansouri. (2008). Factors affecting the export value of

- Rostami, A.(2010). Using Wavelet Transformation and Neural Network for Detecting Blank (Hollow) Pistachio Nuts ,40(2):155-161
- [10] Rostami, A. (2007). Detection hollow pistachios from kernels using Acoustic response processing in time and frequency domains. Master's thesis, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran.
- [11] Diezma-Iglesias, B., Ruiz-Altisent, M., & Barreiro, P. (2004). Detection of internal quality in seedless watermelon by acoustic impulse response. *Biosystems Engineering*, 88(2): 221-230.
- [12] Mahmoudi, A., & Sedghi, A. (2019). Intelligent Acoustic System for Online Grading of Almonds. National Congress on Biosystems Engineering and Mechanization of Iran, Ahvaz.
- [13] Pearson, T. 2001. Detection of pistachio nuts with closed shells using impact acoustics. *Applied Engineering in Agriculture*, 17(1): 249-253.
- [13] Dehani, M. (2014). Signals and Systems. Scientific and Cultural Institute of Nass.
- [14] Elbatawi, I. E. (2008). An acoustic impact method to detect the hollow heart of potato tubers. *Biosystems Engineering*, 100(2), 206-213.
- [15] Chen, P., Sun, Z., & Huang, L. (1992). Factors affecting acoustic responses of apples. *Transactions of the ASAE*, 35(6), 1915-1920.
- [16] Jahangiri, M. (2016). Analysis of the acoustic response of cucumber fruit during storage and its relation to mechanical properties. Ph.d Thesis, University of Tehran, Iran.
- [17] Jancsó, P. T., Clijmans, L., Nicolai, B. M., & De Baerdemaeker, J. (2001). Investigation of the effect of shape on the acoustic response of conference pears by finite element modelling. *Postharvest Biology and Technology*, 23(1), 1-12.
- agricultural products with emphasis on export standards for pistachios, almonds, saffron, dates, and apples. *Journal of Agricultural Sciences, Special Issue on Agricultural Economics and Development*, 22(10), 125-135.
- [2] Onaran, I., Ince, N. F., Tewfik, A. H., & Cetin, A. E. (2007). A signal representation approach for discrimination between full and empty hazelnuts. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 22: 2464-2468.
- [3] Aboonjami, M. Jahangiri, M., S.R. Hassan-Beygi (2015). A Review on Application of Acoustic Analysis in Quality Evaluation of Agro-food Products. *Journal of Food Process Eng*,39(6), 3175-3188
- [4] Reshadsedghi A, A. Mahmoudi, V. Azimirad and J. Hajilou. (2016). Construction and Evaluation of Intelligent Acoustic System for Real-Time Grading of Almonds. *Journal of Engineering Research in Agricultural Mechanization and Systems* , 16(1):31-46
- [5] Sajjadi, J. (2017). Application of acoustics in the detection of pest-infested wheat grains. *Journal of Sound and Vibration Scientific and Extension Journal*.6(1):3-9
- [6] Dematte, M. L., Pojer, N., Endrizzi, I., Corollaro, M. L., Betta, E., & Aprea, E. (2014). Effects of the sound of the bite on apple perceived crispness and hardness. *Food Quality and Preference*, 38, 58-64.
- [7] Khalesi, S., Mahmoudi, A., Hosainpour, A., & Alipour, A. (2011). Detection of walnut varieties using impact acoustics and artificial neural networks (ANNs). *Modern Applied Science*, 6(1), 43.
- [8] Gasperi, F., Grimi, N., Mamouni, F., Lebovka, N., Vorobiev, E., & Vaxelaire, J. (2010). Acoustic impulse response in apple tissues treated by pulsed electric field. *Biosystems Engineering*, 105(2), 266-272.
- [9] Sajjadi, J., Ghazanfari Moghaddam. A.,

[18] Mahmoudi, A. Omid, M., , & Omid, M. H. (2009). An intelligent system for sorting pistachio nut varieties. *Expert Systems with Applications*, 36, 11528-11535.

[19] Jafari, A., et al. (2014). Using sound reflection technology, signal processing, and artificial neural networks to separate hazelnuts of different sizes. *Research and Innovation in Food Science and Technology*.