

مقایسه کارآیی مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و آنفیس در درجه‌بندی آکوستیک ارقام مختلف بادام

علی رشادصدقی^{۱*} و اصغر محمودی^۲

چکیده

با توجه به امکان مخلوط‌شدن انواع بادام سنگی، نیمه‌کاغذی و کاغذی با ارزش اقتصادی متفاوت پس از برداشت محصول، استفاده از یک سامانه جداکننده مؤثر برای عرضه محصولی یکنواخت به بازار فروش، اهمیت بسزایی دارد. در این پژوهش با به‌کارگیری سامانه آکوستیکی برای درجه‌بندی ارقام بادام در سه طبقه بادام سنگی، نیمه‌کاغذی و کاغذی، سیگنال صوتی حاصل از سقوط و برخورد هسته بادام با صفحه فولادی، با استفاده از یک میکروفون دریافت شد و ویژگی‌هایی نظیر دامنه، فاز و چگالی طیف توان پس از پردازش سیگنال‌ها در حوزه زمان و با تبدیل فوریه سریع در حوزه فرکانس استخراج گردید. برای تشخیص و طبقه‌بندی سیگنال‌های صوتی، تکنیک‌های هوش مصنوعی، شامل شبکه عصبی مصنوعی و استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (انفیس) به کار گرفته شد و کارآیی آن‌ها از نظر دقت مورد مقایسه قرار گرفت. شبکه عصبی مورد استفاده، از نوع پرسپترون چندلایه با الگوریتم پس انتشار خطا و تابع یادگیری لونبرگ-مارکوارت (LM) بود. در طبقه‌بندی با مدل انفیس، به دلیل محدودیت این مدل در تعداد ورودی‌ها، از سه مؤلفه اصلی چگالی طیف توان که از اولویت بالاتری برخوردار بودند، به‌عنوان ورودی و از تکنیک شبکه‌ای با روش بهینه‌سازی هیبرید برای آموزش استفاده شد. در مقایسه کارآیی دو تکنیک هوش مصنوعی در درجه‌بندی ارقام بادام، مدل شبکه عصبی مصنوعی با میانگین دقت طبقه‌بندی ۹۶/۲ درصد نسبت به مدل انفیس با میانگین دقت ۸۱ درصد، از عملکرد بهتری برخوردار بود.

واژه‌های کلیدی: آکوستیک، استنتاج فازی، استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (انفیس)، بادام، درجه‌بندی آکوستیک، شبکه عصبی مصنوعی.

ارجاع: رشادصدقی ع. و محمودی ا. ۱۳۹۶. مقایسه کارآیی مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و آنفیس در درجه‌بندی آکوستیک ارقام مختلف بادام. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۶(۲): ۳۱-۴۰.

۱- استادیار پژوهش بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی.

۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

* نویسنده مسئول: reshadsedghi@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۵/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۲۶

مقدمه

از جمله مشکلات ایران در زمینه صادرات محصولات کشاورزی، نبود بسته‌بندی مطلوب، درجه‌بندی نامناسب و رعایت‌نکردن استاندارد کیفی محصولات کشاورزی صادراتی و همچنین عدم تطابق کالاها با سلیقه‌های مصرف‌کنندگان خارجی است؛ در نتیجه، ارزش افزوده حاصل از خدمات بازاریابی نصیب کشورهای واردکننده از ایران می‌گردد (Aghel et al., 2008). بر اساس آمار اعلام‌شده از سوی سازمان خواروبار کشاورزی، سالانه حدود ۲ میلیون و ۶۰۰ هزار تن بادام در جهان تولید می‌شود که ایران با تولید حدود ۸۷ هزار تن، در جایگاه پنجم تولید جهانی این محصول قرارگرفته‌است. بادام ایرانی، بالاترین ارزش صادراتی را در جهان به میزان ۸۴۰۰ دلار به ازای هر تن دارد؛ ولی با این‌حال، سهم ایران از صادرات این محصول فقط ۰/۲۲ درصد است (Anonymous, 2013). کمبود امکان برداشت مکانیزه و همچنین نبود صنایع تبدیلی مناسب در کشور از جمله مشکلات عمده تولید و صادرات این محصول به شمار می‌آید. در باغ‌های سنتی و مدرن ایران ارقام و ژنوتیپ‌های مختلفی از بادام یافت می‌شود که اغلب هنگام برداشت و یا انبارکردن محصول، با هم مخلوط شده و به بازار عرضه می‌گردند. تفکیک بادام بر اساس اختلاف در ارزش‌گذاری بازار، در سه نوع بادام سنگی، نیمه‌کاغذی و کاغذی انجام گرفته‌است و بهای بادام کاغذی به دلیل داشتن درصد مغز بیشتر و سهولت شکسته‌شدن پوسته آن نسبت به نوع نیمه‌کاغذی و سنگی، دو تا سه برابر بیشتر است و این مسئله، اهمیت و لزوم تفکیک کامل و دقیق‌تر آن‌ها را از یکدیگر بیشتر می‌نماید. برای شکستن بادام و جداکردن مغز از پوسته توسط دستگاه بادام‌شکن، بادام را از میان غلتک‌های برشی عبور می‌دهند. مقدار نیروی لازم برای ایجاد ترک در پوسته بادام، بستگی به میزان سختی پوسته دارد که این صفت در ارقام مختلف بادام متفاوت است. به همین جهت، در شکستن بادام و جداسازی مغز، باید محصولی که وارد سیستم می‌شود از یکنواختی ضخامت و سختی پوسته برخوردار باشد و لازمه این کار، جداسازی اولیه محصول بر اساس رقم از نظر سختی پوسته است (Borrell, 2015). روش سنتی برای جداکردن ارقام بادام، با استفاده از اختلاف چگالی آن‌ها و از طریق غوطه‌ور

ساختن در حوضچه آب‌نمک و یا استفاده از سرعت نهایی^۱ هوا در دستگاه‌های بوجاری دمشی تا حدودی میسر است؛ ولی دقیق نیست. بنابراین، تفکیک ارقام بادام با استفاده از یک سامانه جداکننده مؤثر برای عرضه محصولی یکنواخت به بازار فروش ضروری به نظر می‌رسد.

آزمون‌های آکوستیک، شامل آزمون‌های صوتی و فراصوتی، از فنون جدید در زمینه تعیین ویژگی‌های محصولات کشاورزی می‌باشند. یکی از روش‌های آزمون آکوستیک، روش میکروفون مبناسست که در آن از میکروفون برای دریافت پاسخ آکوستیک استفاده می‌شود و به خاطر نداشتن تماس بین حسگر و محصول، سریع عمل می‌کند و مورد توجه بسیاری از پژوهش‌گران قرار گرفته است. در کارهایی همچون بازرسی، جداسازی و درجه‌بندی محصول از طریق آکوستیک، هدف این است که یک جسم که گروه آن مشخص نیست با کمک صفات کسب‌شده از آن جسم، به گروه یا دسته خاصی نسبت داده شود. برای گروه‌بندی صفات جسم می‌توان از تکنیک‌های هوش مصنوعی، از قبیل شبکه‌های عصبی مصنوعی، الگوریتم‌های ژنتیک، روش‌های استنتاج فازی و یا ترکیب آن‌ها استفاده کرد. در شبکه‌های عصبی مصنوعی پس از آموزش شبکه، اعمال یک ورودی خاص به آن منجر به دریافت پاسخ خاصی می‌شود. شبکه بر مبنای تطابق و هم‌سنجی بین ورودی و هدف سازگار می‌شود تا این‌که خروجی شبکه و خروجی مورد نظر (هدف) بر هم منطبق گردند (Kia, 2012). سیستم استنتاج فازی بر اساس قواعد اگر- آنگاه بنا نهاده شده‌است؛ به‌طوری‌که با استفاده از قواعد مزبور می‌توان به‌عنوان یک مدل پیش‌بینی برای شرایطی که داده‌های ورودی و یا خروجی دارای عدم قطعیت بالایی باشند، استفاده کرد (Koorepazan- Dezfuli, 2008). گاهی در مدل‌سازی یک سیستم استنتاج فازی، امکان تشخیص تابع عضویت از طریق بررسی داده‌ها وجود ندارد. در چنین مواردی، می‌توان از تکنیک‌های یادگیری عصبی - تطبیقی^۲ در جعبه‌ابزار منطق فازی نرم‌افزار MATLAB کمک گرفت. یادگیری عصبی - انطباقی دارای عملکردی مشابه با شبکه‌های عصبی می‌باشد (Kia, 2012). امروزه، پژوهش‌گران با بهره‌گیری از روش‌های مختلف پردازش سیگنال و تکنیک‌های هوش مصنوعی، سعی در بالابردن

1- Critical velocity

2- Neuro-Adaptive

ویژگی‌های سیگنال صوتی، شامل دامنه سیگنال در حوزه زمان و چگالی طیف توان^۵ در حوزه فرکانس مد نظر قرار گرفتند. با تعیین مدل بهینه شبکه عصبی، جداسازی پسته‌های خندان، ناخندان و نیمه‌خندان به ترتیب با دقت ۹۷/۳، ۹۶/۷ و ۹۳/۱ درصد انجام شد (Ebrahimi & Mollazadeh, 2010). با استفاده از سیگنال‌های صوتی حاصل از ضربه، استخراج ۱۲ ویژگی آماری از سیگنال صوتی و قواعد حاصل از یک درخت تصمیم و سیستم استنتاج فازی، روشی بر پایه الگوریتم را برای جداسازی چهار رقم بادام ارائه کردند. دقت موتور استنتاج فازی برای طبقه‌بندی واریته‌های بادام ۸۴/۱۶ درصد گزارش شد. در یک پروژه تحقیقاتی، سیگنال‌های صوتی حاصل از برخورد گردو با یک صفحه فولادی توسط میکروفون دریافت شد و با به‌کارگیری سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (انفیس)^۶، طبقه‌بندی گردوهای توپر و پوک از یکدیگر با دقت ۱۰۰٪ انجام شد (Khalifa & Komarizadeh, 2012). (2012). *Atmaca et al.* روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، استنتاج فازی و انفیس را برای تخمین مصرف سوخت اتومبیل مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که در یک سیستم پیچیده با داده‌های بسیار زیاد، استفاده از انفیس به علت کوتاه‌بودن زمان آموزش مفیدتر از شبکه عصبی مصنوعی است. در آموزش داده‌ها، انفیس خطای کمتری نسبت به سایر روش‌ها دارد؛ ولی زمانی که از مؤلفه‌های آموزش، مانند وزن و بایاس برای داده‌های اعتبارسنجی استفاده می‌شود، خطای شبکه عصبی مصنوعی کمتر است. این موضوع احتمالاً ناشی از محدودیت ورودی سیستم در انفیس می‌باشد که برای آموزش مطلوب کافی نیست.

هدف از اجرای این پژوهش درجه‌بندی ارقام بادام با سختی و ضخامت پوسته مختلف، با استفاده از سامانه آکوستیک هوشمند بود که برای تشخیص و جداسازی سیگنال‌های صوتی ایجادشده توسط ارقام مختلف بادام، تکنیک‌های مختلف هوش مصنوعی، شامل مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (انفیس) از نظر دقت مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند.

هرچه بیشتر دقت در شناسایی و درجه‌بندی محصولات کشاورزی نموده‌اند، محققین در پژوهشی از روش نوینی با نام «سطح ماریچ چندضربی دوجنسی» برای تحریک آکوستیک گردو و از شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون برای شناسایی و تشخیص ویژگی‌های فیزیکی این محصول استفاده کردند. ضریب همبستگی پیش‌بینی صحیح برای چگالی گردو ۹۵٪، برای تخمین حجم و جرم ۹۸٪ و برای تخمین کرویت و نوع گردو ۹۹٪ به‌دست آمد (Eyvani, 2008). (2008). *Haff & Pearson* با استفاده از تحلیل صدا، پسته‌های کوچک ناخندان را از مغز جدا کردند. این کار مبتنی بر صدایی بود که در اثر برخورد پسته با صفحه فولادی ایجاد می‌شد. برای طبقه‌بندی سیگنال‌ها، از اطلاعات دامنه و فرکانس سیگنال استفاده شد و الگوریتمی پیشنهاد شد که برای جداسازی پسته‌ها نازل هوا را نیز فعال می‌کرد. در آزمایش اولیه ۱۰، ۲۰ و ۴۰ پسته در ثانیه با ترکیب ۱۰٪ پسته ناخندان و ۹۰٪ مغز به‌کار رفت. دقت تشخیص برای پسته ناخندان ۹۶٪ و برای مغز ۹۹٪ حاصل شد (Pearson *et al.*, 2007). یک وسیله زمان واقعی^۱ و غیرمخرب را بر اساس پردازش و تحلیل سیگنال‌های صوتی حاصل از سقوط و برخورد دانه‌های گندم به یک صفحه فولادی، برای بازرسی دانه‌های گندم کرم‌خورده و آسیب‌دیده در ناحیه پوست و جوانه ساختند. از چهار روش مختلف برای استخراج ساختار و پردازش سیگنال‌های صوتی استفاده شد که شامل روش مدل‌سازی سیگنال در حوزه زمان، محاسبه واریانس‌های سیگنال در حوزه زمان با تفکیک پنجره‌های (محدوده‌های) زمان کوتاه^۲، تحلیل دامنه طیف فرکانسی و روش تحلیل طیف تفاضلی^۳، بودند. مشخصه‌های سیگنال‌ها، به عنوان ورودی برنامه تحلیل تشخیص گام به گام^۴ به‌کار گرفته شدند که یک زیرمجموعه کوچک از مشخصه‌ها، برای طبقه‌بندی دقیق به‌وسیله شبکه عصبی انتخاب گردید. با خروجی ارائه‌شده از شبکه، ۸۷ درصد دانه‌های کرم‌خورده و ۹۸ درصد دانه‌های سالم به‌طور صحیح طبقه‌بندی شدند. یک سامانه جداسازی زمان واقعی پسته‌های خندان از ناخندان، با تلفیق تکنیک‌های صوتی و شبکه عصبی مصنوعی، طراحی گردید (Omid *et al.*, 2010). در این سامانه،

1- Real time

2- Short-time variance window processing

3- Differential spectral analysis

4- Stepwise discriminant analysis

5- Power Spectral Density (PSD)

6- Adaptive Neuro-Fuzzy System (ANFIS)

مواد و روش‌ها

نمونه‌های بادام مورد مطالعه، شامل سه رقم بادام سهند، آذر و منقار صفت‌ها بودند که از ایستگاه تحقیقات باغبانی سهند تهیه شدند و طبق گروه‌بندی مؤسسه تحقیقات ثبت و گواهی بذر و نهال، بر اساس اختلافشان در ضخامت و سختی پوسته، به ترتیب در سه طبقه سنگی، نیمه‌کاغذی و کاغذی درجه‌بندی شدند (شکل ۱). برای اندازه‌گیری ضخامت پوسته بادام، از یک کوئیس دیجیتال با دقت اندازه‌گیری ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شد. به منظور طبقه‌بندی نمونه‌های بادام از نظر سختی پوسته، با اعمال بار استاتیکی در امتداد عمود بر سطح پهن هسته بادام، مقدار نیروی حد گسیختگی^۱ پوسته در این راستا، با استفاده از یک دستگاه اینسترون^۲ مدل ۱۱۴۰ منظم به لودسلی با دامنه اندازه‌گیری ۵۰ تا ۵۰۰۰ نیوتن تعیین گردید.

رطوبت نمونه‌های هسته بادام در زمان اجرای آزمایش‌ها در محدوده ۵ تا ۶ درصد بر پایه وزن تر بود که طبق استاندارد ISO 665-2000 مربوط به دانه‌های روغنی (Anonymous, 1991) اندازه‌گیری شد.

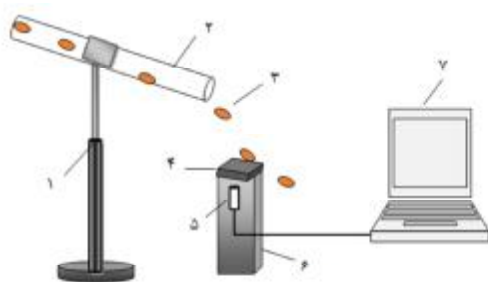


شکل ۱- ارقام بادام مورد مطالعه در سه طبقه سنگی، نیمه‌کاغذی و کاغذی

سامانه صوتی (آکوستیک)

سامانه طراحی‌شده، شامل واحد تغذیه، واحد آکوستیک (صفحه برخورد و دریافت‌کننده صدا) و یک رایانه برای جمع‌آوری و پردازش داده‌ها بود (شکل ۲). نمونه‌های بادام پس از عبور از یک لوله شیب‌دار بر روی صفحه فولادی (صفحه برخورد) سقوط کردند و صدای حاصل از برخورد بادام با صفحه فولادی از طریق یک میکروفون الکترونیک^۳ پاناسونیک (VM-034CY)، که در زیر صفحه و در داخل محفظه آکوستیک جاسازی شده بود، دریافت و به کارت

صوتی رایانه منتقل شد. برای حصول دقت هرچه بیشتر در عمل طبقه‌بندی محصول، باید صداهای اضافی ایجادشده توسط عامل مکانیکی تولید صدا حذف شود. صفحه برخورد باید جرم بیشتری نسبت به هسته بادام داشته باشد تا در هنگام برخورد بادام ارتعاش کمتری به صفحه وارد شود (Pearson, 2001). این ارتعاش ممکن است باعث بروز خطا در تشخیص سیگنال‌های صوتی توسط سامانه گردد. بر طبق این نظریه و نتایج آزمایش‌های اکثر محققان، از جمله (Pearson, 2001) و (Ebrahimi & Mollavade, 2010) و (Omid et al., 2010) که استفاده از صفحه فولادی برای تولید صدای محصول مناسب‌تر تشخیص داده شده‌است، از یک صفحه فولادی صاف با ضخامت ۱۰ میلی‌متر و به ابعاد ۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر به‌عنوان صفحه برخورد استفاده شد. به‌ارای هر نمونه بادام، تنها یک سیگنال صوتی ناشی از برخورد به صفحه لازم بود. بنابراین، شبیه صفحه فولادی طوری تنظیم گردید تا مانع برخورد مجدد بادام به صفحه فولادی در اثر چپش آن پس از برخورد اول گردد. برای جلوگیری از تأثیرگذاری نویز ناشی از سروصدای عوامل خارجی، یک محفظه آکوستیکی چوبی (MDF) و ایزوله، برای قرارگیری میکروفون طراحی و ساخته شد. امواج صدا پس از اینکه از طریق میکروفون به کارت صدا منتقل شدند، در آنجا به مجموعه‌ای از پالس‌های دیجیتال تبدیل و در یک فایل ذخیره شدند. با تغییر سطح حساسیت کارت صدا برای دریافت امواج صوتی از میکروفون، از این ابزار به‌عنوان فیلتر حذف نویز استفاده شد. سیستم رایانه‌ای مورد استفاده در این تحقیق یک لپ‌تاپ با پردازنده Intel(R) Core(TM) i7-2670QM CPU @ 2.70 GHz و 2.20GHz RAM و ۶ گیگابایت RAM بود.



شکل ۲- طرح‌واره سامانه آکوستیک آزمایشی
۱. پایه تغذیه‌کننده، ۲. لوله شیب‌دار، ۳. بادام، ۴. صفحه برخورد، ۵. میکروفون، ۶. محفظه آکوستیک، ۷. رایانه

1- Rupture force
2- Instron
3- Electret microphone capsule

روش آزمون

داده‌های وارده در تحلیل، داده‌های هریک از این دو ویژگی به نصف کاهش داده شد. بنابراین، با در نظر گرفتن سه عامل اندازه سیگنال در حوزه زمان (۱۵۰۰ ویژگی)، چگالی طیف توان و فاز در حوزه فرکانس، هر یک با ۵۱۲ ویژگی، در کل ۲۵۲۴ متغیر برای تشخیص هر نمونه بادام حاصل شد. به علت حجم بالای متغیرهای مورد نظر، از روش آماری تجزیه به مؤلفه‌های اصلی^۶ (PCA) برای کاهش ویژگی‌ها استفاده شد.

تکنیک‌های هوش مصنوعی مورد استفاده

الف) درجه‌بندی بادام با مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

شبکه عصبی مورد استفاده در این تحقیق از نوع پرسپترون چندلایه (MLP) با روش یادگیری پس انتشار خطا بود که الگوریتم‌های مختلف یادگیری با نام‌های کاهش گرادیان با سرعت یادگیری تطبیقی^۷ (gda)، پس انتشار ارتجاعی^۸ (rp)، گرادیان توأم مقیاس شده^۹ (scg) و الگوریتم لوبنبرگ-مارکواریت^{۱۰} (LM) در فرایند آموزش شبکه به کار گرفته شد و عملکرد آن‌ها با هم مقایسه گردید. به منظور جلوگیری از بیش برآزش از تکنیک توقف زودرس استفاده شد. در این تکنیک، ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش، ۱۵ درصد برای آزمون و ۱۵ درصد برای اعتبارسنجی مدل اختصاص داده شد. برای یافتن تعداد مؤلفه‌هایی (متغیرهای ورودی شبکه) که بیشترین دقت جداسازی را داشته باشند، ترکیبات مختلفی از مؤلفه‌های اصلی ویژگی‌های هر سیگنال، به‌عنوان ورودی به شبکه عصبی داده شدند. در نهایت، بهترین ترکیب انتخابی با در نظر گرفتن حداقل تعداد ویژگی‌ها، که منجر به کمترین مقدار MSE شود، انتخاب گردید. برای تعیین تعداد بهینه نورون در لایه مخفی شبکه عصبی، تعداد این نورون‌ها از ۱۰ تا ۴۵ با فواصل پنج‌تایی تغییر داده شد و در هر دور، تا حصول دقت حداکثر، آموزش شبکه ادامه یافت.

ب) درجه‌بندی بادام با مدل انفیس (ANFIS)

در روش‌های استنتاج فازی بین متغیرهای ورودی و خروجی هیچ رابطه مشخصی وجود ندارد و رابطه بین

در اجرای آزمایش‌ها از هر رقم بادام به تعداد ۱۰۰۰ نمونه با اندازه‌های مختلف و به‌طور تصادفی انتخاب و به‌طور مجزا و دستی به لوله شیب‌دار واحد تغذیه سامانه داده شد. پس از برخورد نمونه‌های بادام به صفحه فولادی، سیگنال‌های صوتی دریافت‌شده توسط میکروفون در دامنه [۱ -۱] ولت، برای تجزیه و تحلیل‌های بعدی در رایانه ذخیره شدند. برای جمع‌آوری داده‌ها توسط نرم‌افزار MATLAB 2012a، کارت صوتی رایانه با فرکانس نمونه‌برداری^۱ ۴۴۱۰۰ هرتز و رزولوشن ۱۶ بیتی به‌عنوان ورودی آنالوگ و در حالت On trigger تعریف شد. به منظور جلوگیری از احتمال ایجاد خطای نمونه‌برداری در اثر صداهای محیطی، یک حد آستانه^۲، برابر با ۰/۱ ولت برای ولتاژ تحریک در نظر گرفته شد تا به این ترتیب عمل دریافت داده زمانی فعال گردد که خروجی میکروفون بیش از این حد آستانه شود. برای هر سیگنال مقادیر اوج دامنه^۳ برحسب ولت در فواصل زمانی حدود ۰/۰۲۳ میلی‌ثانیه نمونه‌برداری و در داخل یک بردار ذخیره شدند. با توجه به دامنه تغییرات سیگنال‌های صوتی در حوزه زمان، برداری به طول ۱۵۰۰ نقطه داده برای استخراج ویژگی‌های سیگنال در نظر گرفته شد. عمل داده‌برداری به تعداد نمونه‌های بادام (۱۰۰۰ عدد به ازای هر تیمار آزمایشی) ادامه یافت و در نهایت، کلیه بردارها در ماتریسی به ابعاد ۱۵۰۰×۱۰۰۰، برای پردازش‌های بعدی ذخیره گردیدند. برای محاسبه ویژگی‌های چگالی طیف توان، دامنه و فاز^۴ سیگنال در حوزه فرکانس از تبدیل فوریه سریع^۵ (FFT) با طول بردار ۱۰۲۴ استفاده شد. با استفاده از تابع MATLAB، چگالی طیف توان در حوزه فرکانس طبق رابطه ۱ محاسبه گردید:

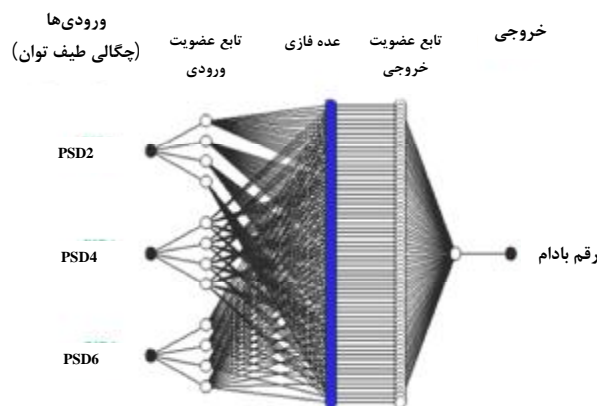
$$PSD = \frac{fftamp * conj(fftamp)}{1024} \quad (1)$$

در این رابطه، بردار fftamp (دامنه در حوزه فرکانس) در مزدوجش conj(fftamp) ضرب شده و بر طول FFT تقسیم شده‌است تا چگالی طیف توان برای هر عضو متناظر به دست آید. با توجه به تقارن زوج منحنی چگالی طیف توان و تقارن فرد منحنی فاز، برای کاهش تعداد

6- Principle Compound Analysis
7- Gradient descent with adaptive learning rate
8- Resilient back-propagation
9- Scaled conjugate gradient
10- Levenberg- Marquardt

1- Sampling frequency
2- Threshold
3- Amplitude
4- Phase
5- Fast Fourier Transformation

مورد ارزیابی قرار گرفت که حالت بهینه با توجه به ضریب همبستگی و مقادیر حداقل خطای حاصل شده در این آزمون، تابع مثلثی (trimf) با ۴ تابع عضویت به ازای هر ورودی به دست آمد. با افزایش تعداد تابع عضویت به بیش از ۴، علاوه بر کاهش سرعت پردازش، از دقت درجه‌بندی نیز کاسته شد. بنابراین، با در نظر گرفتن ۴ تابع عضویت، قواعد فازی به تعداد ۶۴ عدد به طور خودکار توسط نرم‌افزار تدوین گردید. مدل آنفیس فقط در مورد سیستم‌های سوگنو^۵، که از درجه صفر یا یک باشند، کاربرد دارد. این سامانه تنها دارای یک خروجی است که با استفاده از روش غیرفازی‌سازی میانگین وزن‌دار شده^۶ فراهم شده باشد. تابع عضویت خروجی ممکن است ثابت یا خطی (linear) باشد که در این تحقیق، نوع خطی در نظر گرفته شد. با استفاده از فیلد Test FIS، مدل آموزش‌دیده با داده‌های اعتبارسنجی مورد ارزیابی قرار گرفت که نشان‌دهنده هم‌پوشانی داده‌های اعتبارسنجی با خروجی مدل آموزش‌یافته بود. برای ارزیابی آماری دقت سیستم، مدل پیشنهادی FIS را از روی خط فرمان نرم‌افزار MATLAB، تشکیل داد و با استفاده از دستور evalfis خروجی سیستم به دست آمد و ذخیره گردید.



شکل ۳- ساختار مدل ANFIS

نتایج و بحث

شکل ۴، تغییرات میانگین دامنه صوت ۱۰۰۰ نمونه بادام از سه رقم مختلف را در حوزه زمان نشان می‌دهد. از نظر شکل منحنی، هر سه طیف سیگنال مشابه هم بودند. خصوصاً طیف بادام سنگی و نیمه‌کاغذی احتمالاً به دلیل

آن‌ها از طریق فرایند خودیادگیری شناخته خواهد شد. محدودیت اصلی سامانه‌های استنتاج فازی نسبت به شبکه عصبی مصنوعی، در تعداد ورودی‌ها است؛ زیرا با افزایش تعداد ورودی‌ها، تعداد قوانین فازی به صورت نمایی افزایش می‌یابد و نیاز به زمان زیادی برای محاسبه خواهد بود. برای فراهم کردن امکان جداسازی بادام به صورت برخط^۱، کوتاه‌شدن زمان پردازش سیگنال بسیار مهم است. بنابراین، به‌کارگیری کلیه ویژگی‌های استخراج‌شده از سیگنال‌های صوتی حتی پس از تجزیه آن‌ها به مؤلفه‌های اصلی در روش آنفیس مقدور نبود. برای حل مشکل، با استفاده از ابزار انتخاب ویژگی^۲ نرم‌افزار WEKA، از بین کلیه مؤلفه‌های اصلی استخراج‌شده، سه مؤلفه اصلی چگالی طیف توان با علائم PSD1، PSD2 و PSD4، از PSD6 که از اولویت بالاتری برخوردار بودند، انتخاب شدند و در مدل‌سازی آنفیس به‌عنوان ورودی‌های سامانه برای درجه‌بندی بادام در نظر گرفته شدند. ساختار اولیه مدل ANFIS در شکل ۳ نشان داده شده است. در طراحی مدل، دو مجموعه داده به تعداد مشابه (۴۰۰ نمونه به ازای هر پارامتر ورودی) برای آموزش و اعتبارسنجی^۳ مدل اختصاص یافتند و در فایل‌های مجزا ذخیره گردیدند. همچنین، به منظور بررسی عمومیت سیستم استنتاج فازی، یک مجموعه داده آزمایشی^۴ به تعداد ۲۰۰ نمونه به ازای هر پارامتر ورودی در نظر گرفته شد. ایده اصلی استفاده از مجموعه داده‌های اعتبارسنجی بررسی بیش برآزش در مدل است؛ زیرا در صورتی که روال آموزش به شکل نامناسبی انجام شود، مدل بر روی داده‌های آموزشی کاملاً منطبق می‌شود؛ در حالیکه در مورد داده‌های غیرآموزشی پاسخ مناسبی نمی‌دهد (Kia, 2012). پس از بارگذاری فایل‌های داده‌های آموزشی و داده‌های اعتبارسنجی، ساختار اولیه FIS تعیین شد.

برای انتخاب تکنیک جداسازی، از تکنیک شبکه‌ای و از روش بهینه‌سازی hybrid، که ترکیبی از روش حداقل مربعات و روش کاهش شیب پس انتشار می‌باشد، برای آموزش مؤلفه‌های تابع عضویت استفاده شد. برای انتخاب تابع عضویت داده‌های ورودی، انواع توابع موجود در نرم‌افزار با تعداد مختلف تابع عضویت برای آموزش سیستم

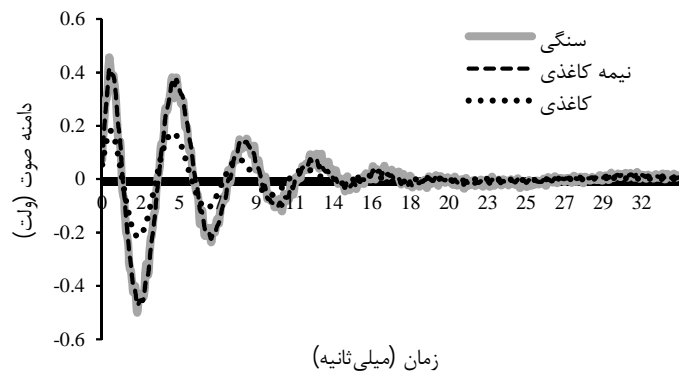
1- On-line
2- Select attributes
3- Checking
4- Testing Dataset

5- Sugeno
6- Weighted average defuzzification

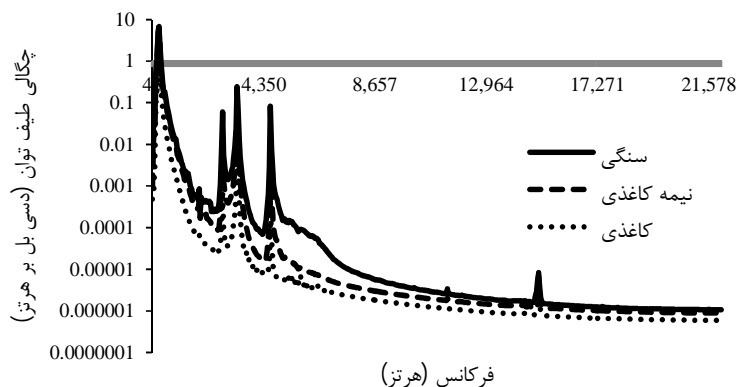
شده‌است. طبق آنچه در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌گردد، ویژگی‌های مختلف سیگنال در حوزه فرکانس از نظر شکل تغییرات در هر سه طبقه بادام مشابه یکدیگرند و اختلاف آن‌ها بیشتر مربوط به شدت یا اندازه آن‌ها در نقاط مختلفی از طول بردار است. منحنی رقم‌های سنگی، نیمه‌کاغذی و کاغذی به دلیل داشتن جرم و سختی بیشتر پوسته، به ترتیب در قسمت بالاتری نسبت به همدیگر قرار گرفته‌اند.

در مورد منحنی فاز (شکل ۶)، شرایط تغییرات طیف صوتی کمی متفاوت است؛ به طوری که از یک مقدار فرکانس (حدود ۶۰۰۰ هرتز) به بعد، ترتیب قرارگیری منحنی‌های ارقام بادام برعکس شده‌است. این‌گونه اختلافات در مشخصه‌های سیگنال‌های صوتی می‌تواند عامل تشخیص و طبقه‌بندی ارقام مختلف بادام توسط تکنیک‌های هوشمند باشد.

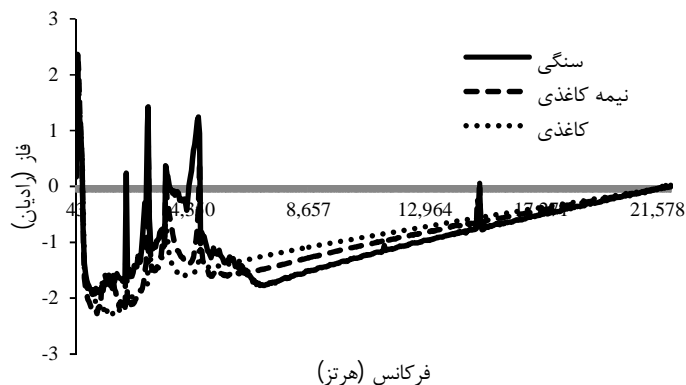
نزدیکی آن‌ها از نظر مقدار جرم و ضخامت پوسته به یکدیگر، کاملاً بر هم منطبق بودند؛ ولی طیف بادام کاغذی با داشتن پوست نازک و جرم کم‌تر، دامنه کوتاه‌تری داشت و بعد از حدود ۵ میلی‌ثانیه، نسبت به دو رقم دیگر تأخیر فاز نشان داده‌است. در حوزه فرکانس بر مبنای تبدیل فوریه سریع، سه ویژگی چگالی طیف توان، اندازه دامنه و فاز سیگنال با ۱۰۲۴ نمونه محاسبه گردید. شکل ۵، منحنی چگالی طیف توان سیگنال و شکل ۶، میانگین فاز سیگنال را پس از تبدیل فوریه سریع برای ۱۰۰۰ نمونه از هر رقم نشان می‌دهد. به دلیل وجود تقارن زوج در چگالی طیف توان و تقارن فرد در فاز سیگنال، فقط نیمه چپ منحنی‌ها، یعنی تا طول بردار ۵۱۲ در شکل‌های مذکور نشان داده شده‌است. همچنین در شکل ۵، به منظور وضوح بیشتر در نمایش اختلاف بین چگالی طیف توان ارقام بادام، منحنی تغییرات آن‌ها به صورت لگاریتمی نشان داده



شکل ۴- تغییرات دامنه سیگنال‌های صوتی در حوزه زمان



شکل ۵- لگاریتم چگالی طیف توان سیگنال‌های صوتی در حوزه فرکانس



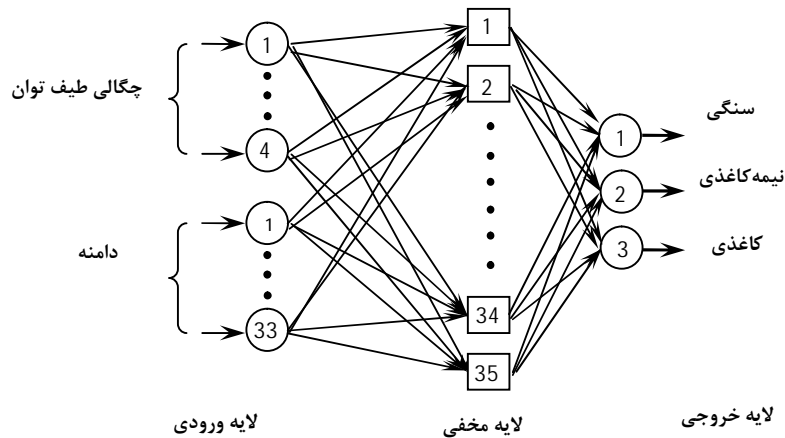
شکل ۶- فاز سیگنال‌های صوتی در حوزه فرکانس

کاغذی تعیین گردید. طبق مندرجات ماتریس اغتشاش مربوط به داده‌های آموزشی، ۹۷/۹ درصد نمونه‌های بادام سنگی، صحیح (True positive)، ۱۵ درصد به اشتباه نیمه‌کاغذی و ۶ درصد آن کاغذی (False negative) تشخیص داده شدند. به همین ترتیب، ۹۸/۰ درصد نمونه‌های بادام نیمه‌کاغذی و ۹۹/۲ درصد بادام کاغذی در طبقه خود به درستی طبقه‌بندی شدند و به طور کلی میانگین طبقه‌بندی صحیح سامانه با داده‌های آموزشی به میزان ۹۸/۴ درصد و با داده‌های اعتبارسنجی به میزان ۹۶/۲ درصد بود. دقت درجه‌بندی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در این پژوهش، با آنچه Omid *et al.* (2010) برای جداسازی پسته خندان از ناخندان و Eyvani (2008) برای تشخیص ویژگی‌های فیزیکی گردو گزارش کرده‌اند، مطابقت دارد.

نتایج درجه‌بندی بادام با مدل شبکه عصبی مصنوعی
نتایج عملکرد الگوریتم‌های مختلف آموزشی شبکه عصبی مصنوعی در جدول ۱ نشان می‌دهد که تابع آموزشی trainlm با میانگین ۹۸/۴ درصد تشخیص صحیح نسبت به توابع دیگر از دقت بیشتری در طبقه‌بندی ارقام بادام برخوردار بوده‌است. مدل شبکه عصبی با الگوریتم یادگیری لوبرگ-مارکوارت (LM) با اختصاص ۴ مؤلفه اصلی اول چگالی طیف توان (PSD1...PSD4) و ۳۳ مؤلفه اصلی اول دامنه سیگنال (AMP1...AMP33) که با بیشترین واریانس و کمترین همبستگی نسبت به یکدیگر مرتب شده‌اند، به‌عنوان ورودی و ۳۵ نورون در لایه مخفی و ۳ رقم بادام به‌عنوان خروجی (شکل ۷)، با میانگین مربعات خطای ۰/۰۲۸ و ضریب همبستگی ۰/۹۸ به‌عنوان مدل بهینه برای درجه‌بندی سه نوع بادام سنگی، نیمه‌کاغذی و

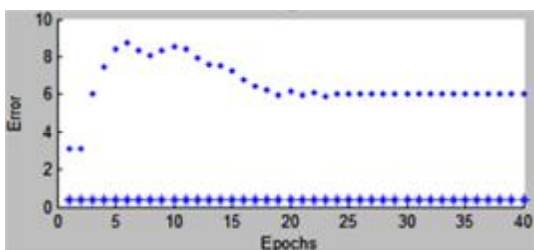
جدول ۱- عملکرد الگوریتم‌های مختلف آموزشی در طبقه‌بندی بادام با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

میزان طبقه‌بندی صحیح (درصد)	ضریب همبستگی	میانگین مربعات خطا	شماره خطا	اندازه لایه مخفی	تعداد نورون	دفعات اجرای آموزش	الگوریتم آموزشی
۹۸/۴	۰/۹۸	۰/۰۲۷۹	$5/9 \times 10^{-8}$	۳۵	۳۴	۵	LM
۹۷/۳	۰/۹۶	۰/۰۳۲۷	۰/۰۰۴۵۸۹۴	۳۵	۱۳۲	۲	RP
۹۶/۳	۰/۹۵	۰/۰۳۰۳	۰/۰۰۴۳۳۴۲	۲۰	۱۰۲	۱	SCG
۹۰/۹	۰/۸۵	۰/۰۷۰۰	۰/۰۹۰۸۹۵	۱۰	۳۴۴	۱	GDA



شکل ۷- ساختار مدل شبکه عصبی مصنوعی برای درجه‌بندی سه رقم بادام

بررسی سطر اول این جدول، از ۲۰۰ بادام سنگی، ۱۵۹ عدد آن به‌درستی بادام سنگی، ۲۵ عدد آن به‌اشتباه بادام نیمه‌کاغذی و ۱۶ عدد آن به‌عنوان بادام کاغذی تشخیص داده شده‌است. بنابراین، طبق نتایج به‌دست آمده، دقت مدل طراحی‌شده انفیس، برای درجه‌بندی ارقام سنگی، نیمه‌کاغذی و کاغذی، به‌ترتیب $79/5\%$ ، $68/5\%$ و 94% و به‌طور میانگین حدود 81% بوده است که نزدیک به دقت درجه‌بندی بادام به روش فازی توسط Ebrahimi & Mollazade (2010) است. بادام نیمه‌کاغذی احتمالاً به دلیل اینکه از نظر خواص فیزیکی، مثل سختی و ضخامت پوسته، حالتی بینابینی با بادام سنگی و کاغذی دارد، با دقت کمتری درجه‌بندی شده‌است؛ البته با توجه به اینکه در نتایج درجه‌بندی با شبکه عصبی مصنوعی این اختلاف دقت در تشخیص بادام نیمه‌کاغذی وجود نداشته است، شاید وجود محدودیت در تعداد داده‌های ورودی مدل فازی باعث این کاهش دقت شده‌است.



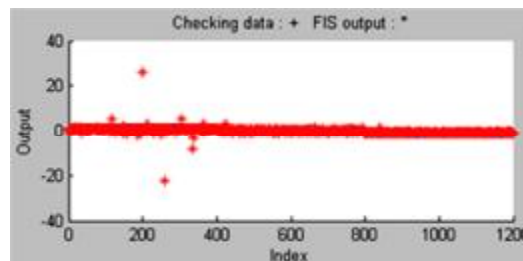
شکل ۸- خطاهای اعتبارسنجی (علامت لوزی) و خطاهای آموزشی (علامت ستاره) در حین عمل آموزش FIS

نتایج درجه‌بندی بادام با مدل ANFIS

با شروع عمل آموزش سیستم، نمودار خطاهای اعتبارسنجی با علامت لوزی و نمودار خطاهای آموزشی با علامت ستاره (*) ترسیم شدند (شکل ۸). همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌گردد، خطای اعتبارسنجی از یک نقطه مشخص رو به افزایش است. این افزایش، نشان‌دهنده وقوع بیش‌برازش است. خطای آموزشی برابر با تفاضل بین داده‌های خروجی آموزشی و خروجی سیستم استنتاج فازی متناظر با آن و خطای اعتبارسنجی برابر با اختلاف خروجی داده‌های اعتبارسنجی و خروجی سیستم استنتاج فازی می‌باشد که به صورت ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در هر دوراپوک محاسبه و ذخیره می‌گردد. انفیس مؤلفه‌های مدل را در نقطه وقوع کمینه خطای اعتبارسنجی انتخاب می‌کند. طبق گزارش برنامه نرم‌افزار متلب، کار آموزش در دومین دور (اپوک)، یعنی همان نقطه بیش‌برازش تکمیل گردیده است. در آخرین اپوک، مدل فازی از تعداد ۱۵۸ گره (node)، ۲۵۶ پارامتر خطی، ۳۶ پارامتر غیرخطی و ۶۴ قاعده فازی تشکیل یافته است و میزان خطای آموزشی و اعتبارسنجی به‌ترتیب $0/38$ و $5/8$ گزارش گردید. با استفاده از فیلد Test FIS، مدل آموزش‌دیده با داده‌های اعتبارسنجی مورد ارزیابی قرار داده‌شد. شکل ۹، میزان هم‌پوشانی داده‌های اعتبارسنجی را با خروجی مدل آموزش‌یافته نشان می‌دهد.

نتایج دقت تشخیص ارقام مختلف بادام توسط مدل انفیس به‌صورت ماتریس اغتشاش در جدول ۲ آمده‌است. با

4. Atmaca, H. Cetisli, B. and Yavuz, H. S. 2001. The comparison of fuzzy inference systems and neural network approaches with ANFIS method for fuel consumption data. Second International Conference on Electrical and Electronics Engineering Papers ELECO. Bursa. Turkey.
5. Borrell, J. V. R. 2015. Shelling-separating machine especially for almonds and other soft-shelled nuts: United States Patent Application Publication. Pub. No. US 2009/0301320AL.
6. Ebrahimi, E. and Mollazade, K. 2010. Integrating fuzzy data mining and impulse acoustic techniques for almond nuts sorting. Australian Journal of Crop Science, 4: 353-358.
7. Eyvani, A. 2008. Walnut acoustic response production and recognition for non-destructive prediction of some physical properties, using artificial neural networks. Tarbiat Modares University, Tehran. Iran. (In Farsi).
8. Haff, R. P. and Pearson, T. C. 2007. Separating in-shell pistachio nuts from kernels using impact vibration analysis. Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety, 1(4): 188-192.
9. Khalifa, S. and Komarizadeh, M. H. 2012. An intelligent approach based on adaptive neuro-fuzzy inference systems (ANFIS) for walnut sorting. Australian Journal of Crop Science, 6: 183-187.
10. Kia, S. M. 2012. Soft computing in MATLAB. Kian Academic Press (second edition). Iran. (In Farsi)
11. Koorepazan Dezfuli, A. 2008. Principles of fuzzy set theory and its application in the modeling of water engineering problems. Jihad Amirkabir University of Technology. Iran. (In Farsi).
12. Omid M. Mahmoudi A. and Omid M. H. 2010. Development of pistachio sorting system using principal component analysis (PCA) assisted artificial neural network (ANN) of impact acoustics. Expert Systems with Applications, 37: 7205-7212.
13. Pearson, T. C. Cetin, A. E. Tewfik, A. H. and Haff, R. P. 2007. Feasibility of impact acoustic emissions for detection of damaged wheat kernels. Digital Signal Processing, 17: 617-633.
14. Pearson, T. 2001. Detection of pistachio nuts with closed shells using impact acoustics. Applied Engineering in Agriculture, 17: 249-253.



شکل ۹- ارزیابی مدل FIS آموزش دیده با داده‌های اعتبارسنجی

جدول ۲- ماتریس اغتشاش درجه‌بندی بادام با مدل آنفیس

دقت درجه‌بندی (درصد)	خروجی			هدف
	کاغذی	نیمه‌کاغذی	سنگی	
۷۹/۵	۱۶	۲۵	۱۵۹	سنگی
۶۸/۵	۳۱	۱۳۷	۳۲	نیمه کاغذی
۹۴/۰	۱۸۸	۱۲	۰	کاغذی

نتیجه‌گیری

در مقایسه کارایی دو تکنیک هوش مصنوعی برای درجه‌بندی ارقام مختلف بادام با استفاده از سامانه آکوستیک طراحی‌شده، مدل شبکه عصبی مصنوعی با میانگین دقت ۹۶/۲٪ نسبت به مدل استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (انفیس) با میانگین دقت درجه‌بندی ۸۱٪ از عملکرد بهتری برخوردار بود. کمتر شدن دقت مدل آنفیس نسبت به شبکه عصبی مصنوعی احتمالاً مربوط به محدودیت در تعداد ویژگی‌های ورودی در انفیس است (Atmaca *et al.*, 2001). البته شاید با استفاده از ویژگی‌های دیگری از سیگنال صوتی به عنوان ورودی سیستم و یا طراحی مدل‌های دیگری از انفیس بتوان دقت درجه‌بندی را بهبود بخشید.

منابع

1. Aghel, H. Yousefzadeh, S. and Mansouri, H. 2008. The Analysis of effective factors on value of agricultural products experts with emphasis on export standards (pistachio, almond, saffron, date and apple). Economics and Agriculture Development, 22: 125-135. (In Farsi).
2. Anonymous. 1991. Unshelled sweet almonds. Annex I: Determination of the moisture content for dry produce (Nuts), United Nations. UNECE Standard DDP-05. New York and Geneva.
3. Anonymous. 2013. FAOSTAT Database. <http://faostat3.fao.org/> (accessed: 25 May, 2015).