

مدل پیش‌بینی خواص مکانیکی شبه‌استاتیکی بادام با استفاده از شبکه عصبی - موجک

عبداله ایمان‌مهر^{*۱} و ناصر گنجی^۲

چکیده

در طراحی و ساخت ادوات و ماشین‌های مورد نیاز برای مراحل مختلف پس از برداشت، فرآوری و بسته‌بندی محصولات، تعیین خواص مکانیکی ضروری است. شبکه عصبی به‌عنوان یکی از مولفه‌های اصلی هوش محاسباتی بوده و تبدیل موجک باعث افزایش دقت مدل می‌شود. به این منظور برای پیش‌بینی خواص مکانیکی مغز بادام، در این تحقیق ابتدا در وضعیت قرارگیری افقی بادام، نیروی شکست شبه‌استاتیکی مغز سه رقم بادام به نام‌های مامایی، ربیع و شاهرود دوازده در سه سطح رطوبتی (۵/۵٪، ۱۵٪ و ۲۵٪ بر پایه تر) و سه سرعت بارگذاری (۵، ۱۵ و ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه) تعیین و بررسی شد. در بخش شبکه عصبی، پارامترهای ورودی شامل سه سطح رطوبت و سه سطح سرعت به‌عنوان متغیر مستقل وارد مدل شدند. متغیرهای نیروی شکست، انرژی مصرفی و مدول الاستیسیته به‌عنوان متغیرهای وابسته خروجی مدل در نظر گرفته شدند که برای دقت بیشتر ابتدا موجک‌های مختلف مانند Haar، db4، Sym2 و Coif4 بر روی این داده‌ها اعمال گردید. برای ارزیابی دقت مدل از معیار ضریب همبستگی (R) استفاده شد. نتایج ارزیابی متقابل، حاکی از برتری موجک Coif4 بود. در این الگوریتم از یک شبکه پیش‌خور با الگوریتم لوبنبرگ مارکوات با تابع تانژانت سیگموئید در لایه پنهان و تابع خطی در لایه خروجی استفاده شد. نتایج حاصل، دقت بالای شبکه عصبی - موجک را نشان می‌دهد. به طور مثال در رقم مامایی، شبکه عصبی با آرایش ۱-۵-۲ با $R=0/9523$ ، آرایش ۱-۷-۲ با $R=0/9745$ و آرایش ۱-۴-۲ با $R=0/8374$ بهترین پیش‌بینی را به‌ترتیب برای مدول الاستیسیته، نیروی شکست و انرژی مصرفی نشان داد.

واژه‌های کلیدی: بادام، خواص مکانیکی، ضریب همبستگی، شبکه عصبی موجک، ماشین‌های فرآوری.

ارجاع: ایمان‌مهر ع. و گنجی ن. ۱۳۹۸. مدل پیش‌بینی خواص مکانیکی شبه‌استاتیکی بادام با استفاده از شبکه عصبی - موجک. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۸(۲): ۱۲۱-۱۲۹.

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اراک.

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اراک.

* نویسنده مسئول: a-imanmehr@araku.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۰۳

مقدمه

بادام، گونه‌ای درخت بومی خاور میانه و آسیای جنوبی است. ایران یکی از مهم‌ترین خاستگاه‌های اصلی برای گونه‌های متنوع بادام وحشی در جهان است. در گستره وسیع کشورمان ایران تا به امروز بیش از ۲۰ گونه از این گیاه شناسایی شده است (Madam et al., 2011). این محصول ارزش صادراتی بالایی دارد و به‌همین دلیل توجه به توسعه و بهبود تولید و فرآوری آن از اهمیت خاصی برخوردار است. بادام از جمله محصولات با ارزشی است که تولید سالانه آن در ایران بیش از ۱۰۰ هزار تن است. ایران بعد از آمریکا، اسپانیا و ایتالیا مقام چهارم تولید این محصول را در جهان به خود اختصاص داده است (FAO, 2011). با توجه به افزایش تولید بادام و سودآوری این محصول ارزشمند غذایی، ضروری است در زمینه خواص فیزیکی و مکانیکی آن، تحقیقاتی انجام گیرد که اولین گام در این زمینه، مکانیزه کردن عملیات کشاورزی آن است. برای طراحی تجهیزات مربوط به کاشت، برداشت، انتقال، انبارداری و فرآوری بادام، آگاهی به خصوصیات فیزیکی آن ضروری است. خواص فیزیکی مواد مانند شکل، حجم و مساحت با طراحی و توسعه ماشین‌های مخصوص آنها مرتبط هستند (Mohsenin, 1986). اندازه، شکل و خصوصیات مکانیکی برای طراحی ماشین‌های مربوط به جداسازی، برداشت و دسته‌بندی مهم است. چگالی ظاهری و تخلخل، در میزان بار وارده بر سازه‌ها اثر می‌گذارد و یکی از پارامترهای اصلی در پیش‌بینی بارهای وارده به سازه‌های انتقال است. در یک روش جدید، برای شناسایی رفتار الاستیک مواد سلول‌دار از منحنی نیرو-تغییر شکل در بارگذاری شبه‌استاتیک استفاده شد (Henry et al., 2000). محققان، این روش را برای سویا، برگ تنباکو و بافت گوجه فرنگی در آزمون‌های فشاری و کششی به‌کار بردند. ایشان دریافتند، منحنی نیرو-تغییر شکل در مواد سلول‌دار را می‌توان با چند جمله‌ای تیلور درجه سه با R^2 بیش از ۰/۹ توصیف کرد.

در باغ‌های سنتی و مدرن ایران، ارقام مختلفی از بادام را می‌توان پیدا کرد. در مرحله برداشت و بعد از چیدن بادام از درختان و یا در مرحله ذخیره‌سازی، ممکن است که این گونه‌ها با هم مخلوط شوند. در بازاریابی و صنعت پردازش بادام نیز مانند سایر محصولات کشاورزی، لازم است که محصولات از نظر گونه یکنواخت باشند. ویژگی‌های

مختلف نظیر سختی پوسته و ضخامت آن، شکل، اندازه، درصد و طعم مغز، بر قیمت بازاریابی بادام تأثیرگذار است، به‌طوری که بادام با پوسته نرم قیمت بیشتری دارد (Altuntas et al., 2010).

سختی پوسته بادام در ارقام مختلف متفاوت است و خواص هندسی و مکانیکی رقم بادام روی عملیات شکست تأثیر می‌گذارد. از آنجایی که ماشین‌های کشاورزی در مراحل مختلف برداشت، حمل و نقل و ذخیره‌سازی با محصول در تعامل هستند، شناخت خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی محصولات کشاورزی و مواد غذایی دارای اهمیت هستند (Kilickan & Guner, 2008). اطلاعات مربوط به خواص مکانیکی در طراحی تجهیزات، آسیاب کردن، جابجاکردن، انبار کردن، حمل‌ونقل و فن‌آوری مفید هستند (Kashaninejad et al., 2005). هدف اصلی از فرآوری محصولات، به حداقل رساندن افت کمی و کیفی آنها پس از برداشت است. شناخت خواص فیزیکی و مکانیکی محصولات کشاورزی و مواد غذایی همواره مورد توجه و علاقه متخصصین کشاورزی و صنایع غذایی بوده است. تاکنون روش‌های زیادی برای شناخت خواص بافت مواد بیولوژیک استفاده شده است. روش‌های مکانیکی به علت سادگی از عمومیت بیشتری برخوردارند. رفتار محصول کشاورزی که تحت نیرویی قرار دارد از خواص مکانیکی آن تأثیر می‌پذیرد و بر فرآوری محصولات کشاورزی تأثیر به‌سزایی دارد.

در صنعت مواد غذایی برای بررسی کیفیت، تشخیص آسیب و مرتب‌سازی محصول، تکنیک‌های مختلفی از جمله نوری، مکانیکی، الکتریکی و آکوستیک مورد استفاده قرار می‌گیرند. امکان استفاده از چنین سیستم‌هایی برای بررسی و تلاش برای بهبود کیفیت محصول وجود دارد در حالی که در روش سنتی که به‌طور دستی انجام می‌پذیرد، این امکان وجود ندارد (Omid et al., 2010).

در مطالعه‌ای به‌منظور شناسایی و طبقه‌بندی انواع مختلف بادام، بر اساس ضخامت پوسته و سختی آن، از تأثیر سیستم‌های صوتی و تکنیک شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. در این پژوهش نرخ طبقه‌بندی صحیح برای بادام با پوست سخت، نیمه‌نرم و نرم به ترتیب ۹۳/۷۸، ۹۴/۵۱ و ۹۹/۶۳ درصد به‌دست آمد (Reshadsedghi and Mahmoudi, 2013). در پژوهشی دیگر خواص فیزیکی یک رقم بادام درختی و مغز آن شامل خصوصیات

برای این کار از مقایسه آماری پارامترهایی مانند میانگین، واریانس، توزیع آماری و رابطه رگرسیونی بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی و مقادیر واقعی آنها استفاده شد. نتایج حاکی از عدم وجود تفاوت معنی‌داری در سطح ۵ درصد بین مقادیر ویژگی‌های آماری مجموعه داده‌های پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی و مقادیر واقعی آنها بود. هم‌چنین ضرایب همبستگی بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده بزرگتر از ۰/۹ بود (Rohani et al., 2015).

در مطالعه‌ای دیگر، پیش‌بینی مقدار جذب رطوبت سه رقم جو در فرآیند غوطه‌وری با استفاده از مدل ریاضی و شبکه عصبی مصنوعی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در سه دمای ۱۰، ۲۰ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد و در سه تکرار برای هر نمونه با آب مقطر انجام شد. مدل ویسکوالاستیک که توانایی خوبی در تحلیل فاز اول و دوم جذب رطوبت در فرآیند خیساندن محصولات کشاورزی را دارد، مورد استفاده قرار گرفت. در طراحی شبکه عصبی از سه لایه نورون استفاده شد. لایه اول، لایه ورودی که متغیرهای مستقل دما و زمان و لایه دوم، لایه‌های مخفی شبکه و لایه سوم، لایه خروجی که متغیر وابسته محتوای رطوبتی بودند. به‌منظور اعتبارسنجی پیش‌بینی مدل ویسکوالاستیک و شبکه عصبی از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطا استفاده شد. نتایج نشان داد که روش پرسپترون چندلایه به‌دلیل ساختار یادگیری پس از انتشار خطا و ساختار شبکه ۱-۴-۲ بهترین نتایج را برای هر سه رقم جو در مقابل مدل ریاضی ویسکوالاستیک به همراه داشت (kamali et al., 2015).

از شبکه عصبی- موجک به‌عنوان تکنیکی جدید در تحقیقات استفاده می‌شود که در آن یک موج به‌صورت یک تابع نوسان‌کننده تعریف می‌شود. موجک، موج کوچکی است که انرژی آن در ناحیه کوچکی متمرکز شده و ابزاری مناسب برای بررسی پدیده‌های ایستا و گذرا است (Alidoosti Shahraki et al., 2013).

موجک‌ها توابع خاص ریاضی با خواصی منحصر به‌فرد هستند که امکان پردازش و آنالیز داده‌ها با گستردگی فراوان را در رزولوشن‌های مختلف در زمان فراهم می‌سازند. در حالت کلی برای حل هر مسأله از یکی از توابع موجک استفاده می‌شود که به آن موجک مادر

هندسی، ثقلی، اصطکاکی و نیز سرعت حد دانه به‌عنوان تابعی از محتوای رطوبت بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش محتوای رطوبت، نیروی شکست دانه بادام کاهش می‌یابد (Aydin, 2003). در تحقیقی دیگر تاثیر اندازه بادام و نیز سرعت و جهت بارگذاری بر نیرو، انرژی و توان مورد نیاز برای شکستن پوست چوبی بادام رقم تک‌زاس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که محدوده تغییرات نیرو، انرژی و توان مورد نیاز برای شکست پوست رقم تک‌زاس به‌ترتیب ۱۳۹ تا ۱۵۲۶ نیوتن، ۷۰ تا ۲۰۹۳ میلی ژول و ۰/۱۵ تا ۵/۱۲۱ وات است (Khazaie et al., 2003).

در مطالعه‌ای دیگر خواص مکانیکی دو رقم بادام درختی تحت بارگذاری فشاری بین دو صفحه تخت آزمایش شد و اثر رطوبت و جهت بارگذاری بر بیشینه نیروی شکست، انرژی، چغرمگی و توان مورد نیاز برای شکست دانه بادام مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که رطوبت و جهت بارگذاری بر خواص مکانیکی دانه بادام به‌طور معنی‌داری تأثیرگذار است و بیشینه نیروی شکست زمانی حاصل می‌شود که جهت اعمال نیرو در راستای محور طولی بادام باشد (Aktas et al., 2007).

شبکه‌های عصبی از عناصر عملیاتی ساده‌ای ساخته شده‌اند که به‌صورت موازی در کنار هم عمل می‌کنند. این عناصر از سیستم‌های عصبی زیستی الهام گرفته شده‌اند. شبکه‌های عصبی نوعی مدل‌سازی از سیستم‌های عصبی واقعی هستند که در علوم مختلف کاربردهای فراوانی دارند. حوزه کاربرد این شبکه‌ها آن‌چنان گسترده است که از کاربردهای طبقه‌بندی گرفته تا کاربردهایی نظیر درون‌یابی، تخمین، آشکارسازی و غیره را شامل می‌شوند. مهم‌ترین مزیت استفاده از این شبکه‌ها در کنار سهولت استفاده، توانایی فوق‌العاده آنها در پیش‌بینی پارامترهای مورد نظر است (Kia, 2011). شبکه عصبی مصنوعی با داشتن قابلیت یادگیری، تعمیم‌دهی، پردازش موازی و تصمیم‌گیری، توانایی حل کامل مسائلی پیچیده با ماهیتی خطی یا غیرخطی را دارد. ویژگی دیگر این شبکه‌ها وابسته نبودن آنها به فرضیه‌های اولیه درباره داده‌های ورودی است. به این معنا که داده‌ها می‌توانند هر توزیع آماری داشته باشند (Menlik et al., 2010).

در پژوهشی توانایی شبکه عصبی مصنوعی به‌منظور پیش‌بینی حجم، سطح جانبی و کرویت انار ارزیابی شد.

$$Q = \frac{W_i(M_f - M_i)}{(100 - M_f)} \quad (1)$$

که در این رابطه Q ، وزن آب اضافه شده (کیلوگرم)، W_i ، وزن اولیه نمونه (کیلوگرم)، M_i ، درصد رطوبت اولیه نمونه (بر پایه تر) و M_f ، درصد رطوبت نهائی نمونه (بر پایه تر) است. آب مورد نیاز به دانه‌ها اضافه و با آنها کاملاً مخلوط شد. سپس دانه‌ها در کیسه‌های پلاستیکی کاملاً مسدود و به مدت سه روز در یخچال و در دمای ۱۰ درجه سلسیوس نگهداری شدند تا به سطح رطوبتی مطلوب و یکنواخت برسند (Salcilik, 2009). یک ساعت قبل از شروع آزمایشات، به‌منظور هم دما شدن نمونه‌ها با محیط آزمایشگاه، نمونه‌ها از یخچال خارج و در محیط آزمایشگاه قرار گرفتند. از هر نمونه ۳۰ دانه به‌طور تصادفی انتخاب شد.

اندازه‌گیری خواص مکانیکی

در استخراج پارامترهای مکانیکی از طریق آزمون‌های مختلف مانند بارگذاری فشاری بر روی محصولات کشاورزی، منحنی استخراج شده باید به قدری یکنواخت باشد که بتوان از آن در ارزیابی و مقایسه بافت محصولات استفاده نمود. اندازه‌گیری میزان مقاومت و نیروی شکست مواد مختلف همیشه پایه و اساس طراحی بسیاری از دستگاه‌ها و ماشین‌های صنعتی و کشاورزی است. یکی از مهم‌ترین فرآیندهای پس از برداشت، عملیات پوست‌گیری دانه‌ها و خشک‌بار است که در اثر اعمال نیروی فشاری انجام می‌گیرد. بنابراین اندازه‌گیری نیروی شکست دانه‌ها برای ساخت مکانیزم‌های مورد استفاده در این فرآیندها ضروری است. برای تعیین خواص مکانیکی نمونه‌ها (شامل نات و مغز بادام‌ها) در این تحقیق از دستگاه بارگذاری فشاری تک محوری (STM-20) ساخت شرکت سنتام استفاده شد (شکل ۱). از هر رقم به‌طور اتفاقی ۳۰ نمونه انتخاب و با ۵ بار تکرار، با سرعت‌های ۵، ۱۵ و ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه، تحت بار پیوسته‌ای که متناسب با مقاومت بافت دانه افزایش می‌یافت، در وضعیت قرارگیری طولی (خوابیده)، تحت بارگذاری قرار گرفت. هم‌زمان با بارگذاری، منحنی نیرو-تغییر شکل آنها ثبت شد. با استفاده از یک دستگاه سطح‌سنج، سطح تماس صفحه فشار با نمونه‌ها به‌صورت تقریب ۰/۵ سانتی‌متر مربع (۵۰ میلی‌متر مربع) به‌دست آمد. نیروی بیشینه برحسب نیوتن

می‌گویند. سایر موجک‌های مورد استفاده در حل مسأله، نسخه‌های انتقال‌یافته و اتساع‌یافته از موجک مادر هستند که به آنها موجک دختر گفته می‌شود. در زمینه مدل‌سازی با شبکه عصبی تحقیقات زیادی انجام گرفته است. اما در این زمینه، تحقیقات بسیار محدود و تنها با شبکه عصبی استاندارد انجام شده است. در پیش‌بینی نیروی شکست میوه بنه در عملیات خشک‌کردن، بهترین شبکه با آرایش ۱-۶-۸-۳، دارای خطای آموزشی ۰/۹۹۹، خطای نسبی میانگین ۰/۰۲۴ و ۶۹ چرخه آموزش به‌دست آمد که نتایج، برتری استفاده از شبکه عصبی را نشان می‌داد (Khayati and Chayjan-Amiri, 2016). در تحقیقی دیگر سری زمانی رودخانه مالاپراها با استفاده از شبکه عصبی موجک مدل‌سازی شد. در این تحقیق از موجک گسسته استفاده و نتایج حاصل با مدل شبکه عصبی مقایسه شد که نتایج حاکی از برتری مدل شبکه عصبی موجک نسبت به شبکه عصبی بود (Krishna et al., 2011).

هدف از انجام این پژوهش، استفاده از هوش مصنوعی به‌منظور پیش‌بینی خصوصیات مکانیکی مغز بادام (نیروی شکست، مدول الاستیسیته و انرژی شکست) در طی فرآیند شکست شبه‌استاتیکی با استفاده از روش جدید شبکه عصبی-موجک است که اولین بار در این زمینه استفاده می‌شود. در این پژوهش پیش‌بینی نیروی شکست شبه‌استاتیکی مغز سه رقم بادام مامایی، ربیع و شاهرود دوازده در سه سطح رطوبتی و سه سرعت بارگذاری در وضعیت قرارگیری افقی بادام و با استفاده از شبکه عصبی-موجک مورد سنجش قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در دانشکده کشاورزی دانشگاه اراک انجام پذیرفت. سه رقم بادام مامایی، ربیع و شاهرود ۱۲، از مؤسسه جهاد کشاورزی استان چهارمحال و بختیاری تهیه شدند. از هر رقم حدود ۳/۵ کیلوگرم توزین و پس از بسته‌بندی به آزمایشگاه منتقل و در دمای محیط (۲۰ درجه سلسیوس) قرار داده شدند. برای بررسی تأثیر رطوبت بر روی خواص فیزیکی دانه‌ها، نمونه‌هایی با رطوبت‌های ۵/۵٪، ۱۵٪ و ۲۵٪ بر پایه تر تهیه شدند. به این ترتیب، سطوح رطوبتی مختلف (بر پایه تر) با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد.

نخورده می‌توان توصیف کامل‌تری به‌دست آورد. با استفاده از تئوری هرتز نیز مدول الاستیسیته ظاهری برای هر یک از نمونه‌ها و ارقام محاسبه شد. تئوری هرتز در بارگذاری با استفاده از صفحه تخت صلب و روی نمونه کامل با فرض برقرار بودن شرایط تئوری هرتز محاسبه شد. رابطه زیر برای محاسبه مدول الاستیسیته ظاهری استفاده شد.

$$E_a = \frac{0.338F(1-\mu^2)}{D^{3/2}} \left(K_u \left(\frac{1}{R_{1u}} + \frac{1}{R_{2u}} \right)^{1/3} + K_l \left(\frac{1}{R_{1l}} + \frac{1}{R_{2l}} \right)^{1/3} \right)^{3/2} \quad (۳)$$

در این رابطه، E_a مدول الاستیسیته ظاهری با استفاده از روش هرتز بر حسب (N/mm^2) به‌دست می‌آید، که D میزان تغییر شکل (نصف نقطه عطف بر حسب میلی‌متر)، μ ضریب پواسون، F نیروی اعمالی بر حسب نیوتن، R_1 و R_2 به‌ترتیب شعاع‌های انحناهای حداقل و حداکثر میوه در قسمت فوقانی (u) و تحتانی (l) بر حسب میلی‌متر هستند و ثابت K از جدول مربوطه و با استفاده از مقدار $\cos\theta$ از رابطه زیر استخراج می‌شود (Kosma and : ASAE, 1998)؛ (Cunningham, 1962).

$$\cos\theta = \frac{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (۴)$$

ضریب پواسون با استفاده از رابطه (۵) به‌دست آمد (Kojima, 1983). این رابطه بر این اصل استوار است که ضریب پواسون آب میوه برابر 0.5 و ضریب پواسون ماده خشک آن هم برابر 0.1 است.

$$\mu = \frac{0.5mc + 0.1(100 - mc)}{100} \quad (۵)$$

که در این رابطه، mc رطوبت مغز بادام بر مبنای تر است. در نمودار تنش-کرنش، چغرمگی در هر نقطه برابر میزان انرژی جذب شده در آن نقطه است. در نمودار نیرو-تغییر شکل، میزان چغرمگی از تقسیم سطح زیر نمودار تا نقطه مورد نظر بر حجم نمونه حاصل می‌شود که معمولاً در نقطه شکست تعیین می‌شود (Henry et al., 2000).

چغرمگی برای نمونه‌ها با استفاده از انتگرال نمودار نیرو-تغییر شکل در نقطه شکست و حجم آنها به‌دست آمد. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین در نرم‌افزار SAS 9.3 انجام گرفت.

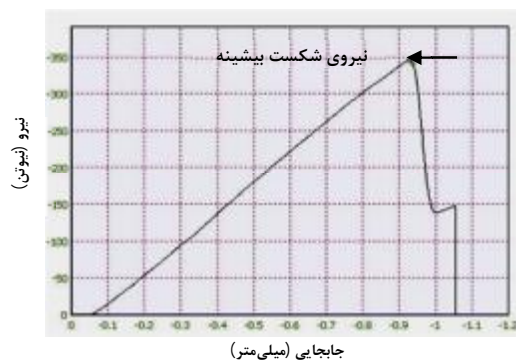
طراحی شبکه عصبی موجک

محققین بیان کرده‌اند که در طراحی شبکه عصبی

از بالاترین نقطه منحنی نیرو-تغییر شکل و پیش از افت ناگهانی آن به‌دست آمد (شکل ۲). همچنین تغییر شکل مربوط به نیروی بیشینه، برحسب میلی‌متر ثبت شد. با استفاده از برازش چند جمله‌ای درجه سه برای منحنی نیرو-تغییر شکل و انتگرال‌گیری از آن در محدوده صفر تا تغییر شکل مربوط به نقطه نیروی بیشینه، مقدار انرژی گسیختگی دانه‌ها محاسبه شد.



شکل ۱- دستگاه آزمون تنش و نمونه تحت آزمون



شکل ۲- نمودار نیرو - جابجایی شکست فشاری بادام

به دلیل محدود بودن بخش کشسان مواد بیولوژیک، خواص بنیادین نظیر ضریب کشسانی ظاهری در نقاط مختلف منحنی، مقادیر متفاوتی خواهد داشت. منحنی نیرو-تغییر شکل در اجسام سلول‌دار را می‌توان با استفاده از بسط تیلور چند جمله‌ای درجه سه، همانند رابطه (۲)، مدل کرد که هر یک از ضرایب بیان‌گر رفتار جسم است (Henry et al., 2000).

$$F = aD + bD^2 + cD^3 \quad (۲)$$

در این رابطه F مقدار نیرو برحسب نیوتن، D مقدار تغییر شکل برحسب میلی‌متر و a ، b و c ضرایب کشسان مدل می‌باشند. با کمک این مدل، از منحنی نیرو-تغییر شکل به‌عنوان شاخصی از ویژگی‌های مکانیکی محصول دست

سه رقم بادام به نام‌های مامایی، ربیع و شاهرود ۱۲، در سه سطح رطوبتی و سه سرعت بارگذاری تعیین و بررسی شد. به‌منظور شناخت اثرات عوامل اعمال شده بر پارامترهای خروجی مورد نظر، خلاصه‌ای از نتایج حاصل، به شرح ذیل آورده می‌شود. به این ترتیب نشان داده می‌شود که پارامترهای مورد بررسی در عمل از نظر تأثیر بر روی هم چه نقشی ایفا می‌کنند تا بتوان در آینده با استفاده از این نتایج از کمیّت و کیفیت اثرات متغیرها بر روی هم استفاده نمود. طبق نتایج، اثر رقم در سطح ۱٪ بر نیروی شکست مغز بادام معنی‌دار شد. نیروی شکست ارقام مامایی و شاهرود ۱۲، به‌ترتیب دارای بیشترین (۱۴۲/۴ نیوتن) و کمترین (۱۲۰ نیوتن) مقدار بودند. اثر رطوبت در سطح ۱٪ بر نیروی شکست مغز بادام معنی‌دار شد. در سطوح رطوبتی ۵/۵٪ و ۱۵٪ (بر پایه تر) به‌ترتیب بیشترین نیروی شکست برابر ۱۵۲/۱ نیوتن و کمترین آن ۱۱۱/۹ نیوتن به‌دست آمد. اثر سرعت بارگذاری در سطح ۱٪ بر نیروی شکست مغز بادام معنی‌دار شد. در سرعت بارگذاری ۵ میلی‌متر بر دقیقه، بیشترین نیروی شکست (۱۴۱/۵ نیوتن) و در دو سرعت ۱۵ و ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه کمترین نیروی شکست حاصل شد. اثر متقابل رقم و رطوبت در سطح ۱٪ بر نیروی شکست مغز بادام معنی‌دار شد. ارقام شاهرود دوازده و مامایی در رطوبت ۵/۵٪ دارای بیشترین نیروی شکست (به‌ترتیب ۱۶۳/۶ و ۱۶۰/۹ نیوتن) و رقم شاهرود در رطوبت ۲۵٪ دارای کمترین نیروی شکست (۹۳ نیوتن) بودند. اثر رقم در سطح ۱٪ بر انرژی شکست مغز بادام معنی‌دار شد. ارقام مامایی و شاهرود ۱۲، به‌ترتیب دارای بیشترین انرژی شکست (۱۲۲/۸ ژول) و کمترین آن (۸۳/۳ ژول) بودند. اثر رطوبت بر انرژی شکست مغز بادام در سطح ۱٪ معنی‌دار شد. با افزایش سطح رطوبت از ۵/۵٪ به ۲۵٪ (بر پایه تر) انرژی شکست مغز بادام به‌طور معنی‌دار از ۷۵/۴۵ ژول به ۱۳۷/۶ ژول افزایش نشان داد. اثر متقابل رقم و رطوبت در سطح ۱٪ بر انرژی شکست مغز بادام معنی‌دار شد و در آخرین ارزیابی مشخص شد که رقم مامایی در رطوبت ۲۵٪ دارای بیشترین (۱۹۲/۵ ژول) و رقم ربیع در رطوبت ۵/۵٪ دارای کمترین (۵۷/۳۲ ژول) انرژی شکست بودند.

مصنوعی، وارد کردن داده‌ها به‌صورت خام باعث کاهش سرعت و دقت شبکه می‌شود. از آنجائی‌که هر کدام از پارامترها تقسیم‌بندی‌های مربوط به خودشان را دارند، برای یکسان کردن دامنه تغییرات آنها عمل نرمال‌سازی داده‌ها انجام می‌گیرد تا از کوچک شدن بیش از حد وزن-های شبکه جلوگیری شود. برای همین منظور با استفاده از رابطه (۶) نرمال‌سازی داده‌ها انجام شد (Kisi, 2008).

$$X_n = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (6)$$

که X_n مقدار نرمال شده، x مقدار هر متغیر ورودی، x_{\min} کمینه داده ورودی، x_{\max} بیشینه داده ورودی است.

ارزیابی عملکرد مدل‌ها

مطابق معادله (۷) برای ارزیابی مدل‌ها از شاخص آماری ضریب همبستگی استفاده شد.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N O_i P_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N O_i^2 \sum_{i=1}^N P_i^2}} \quad (7)$$

که در این معادله، O_i پارامتر محاسبه‌شده، P_i پارامتر شبیه‌سازی شده و R ضریب همبستگی است که هر چه این شاخص به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده همبستگی بالای مدل است.

نتایج و بحث

در بخش اول این پژوهش، برای داشتن اطلاعات لازم از میزان تأثیر متقابل پارامترهای مورد بررسی به‌منظور ارزیابی و تعیین عملکرد مکانیکی ارقام بادام، آزمون شکست شبه‌استاتیکی انجام شد. این آزمون در سطوح مختلف رطوبتی، به‌منظور شناخت تأثیر این متغیرها بر خواص شکست انجام و نتایج آنالیز واریانس آزمون فشار مغز بادام ارائه شد. بر اساس جدول (۱)، اثر رقم و رطوبت و اثر متقابل رقم و رطوبت در سطح ۱٪ بر نیرو و انرژی شکست مغز بادام و هم‌چنین اثر سرعت بارگذاری بر نیروی شکست در سطح ۱٪ معنی‌دار شد. هیچ یک از پارامترهای رطوبت و سرعت، بر روی مدول الاستیسیته اثر معنی‌داری را نشان ندادند و میانگین مدول الاستیسیته ۱۵/۹ مگاپاسکال به‌دست آمد. در این تحقیق در وضعیت قرارگیری افقی بادام، نیروی شکست شبه‌استاتیکی مغز

جدول ۱- نتایج آنالیز واریانس (میانگین مربعات) آزمون فشار مغز بادام

منابع تغییرات	درجه آزادی	نیروی شکست	انرژی شکست	مدول الاستیسیته
رقم	۲	۱۱۳۵۸/۹۷۹ ^{**}	۳۵۳۷۰/۲۷۷ ^{**}	۸۶۸۰/۰۷۸ ^{ns}
رطوبت	۲	۳۶۸۶۱/۴۹۷ ^{**}	۹۱۶۵۷/۲۹۳ ^{**}	۶۵۰۳/۰۳۴ ^{ns}
رقم×رطوبت	۴	۱۳۶۶۱/۵۰۵ ^{**}	۳۶۰۲۷/۹۵۴ ^{**}	۷۶۹۰/۱۷۸ ^{ns}
سرعت بارگذاری	۲	۱۰۱۰۹/۱۲۵ ^{**}	۷۸۰۱/۸۶۳ ^{ns}	۹۳۰۴/۰۴ ^{ns}
رقم×سرعت	۴	۷۰۵/۵۱۱ ^{ns}	۱۰۰۶/۹۳۸ ^{ns}	۸۴۱۴/۵۸۱ ^{ns}
رطوبت×سرعت	۴	۶۰۷/۶۰۳ ^{ns}	۶۵۰/۰۳۲ ^{ns}	۷۱۳۴/۲۸۹ ^{ns}
رقم×رطوبت×سرعت	۸	۱۶۹۱/۲۲۴ ^{ns}	۲۲۲۰/۳۳۹ ^{ns}	۷۲۶۹/۵۸ ^{ns}
خطا	۲۴۳	۱۳۸۹/۳۴	۲۹۶۵/۸۳۲	۷۵۷۴/۹۲۹
% ضریب تغییرات		۲۸/۵۴	۵۳/۲۶	۴۰۵/۳۹

* معنی داری در سطح ۵% ** معنی داری در سطح ۱% ns عدم معنی داری

نتایج شبکه عصبی - موجک

در بخش دوم این پژوهش به منظور پیش‌بینی خصوصیات مکانیکی مغز بادام (نیروی شکست، مدول الاستیسیته و انرژی شکست) در طی فرآیند شکست شبه‌استاتیکی، از تکنیک هوش مصنوعی و روش جدید شبکه عصبی-موجک استفاده شد. به طوری که سه رقم بادام به نام‌های مامایی، ربیع و شاهرود ۱۲، در سه سطح رطوبتی و سه سرعت بارگذاری در وضعیت قرارگیری افقی بادام در نظر گرفته شدند. ورودی مدل سه سطح سرعت و سه سطح رطوبت بوده و انرژی مصرفی، نیروی شکست و مدول الاستیسیته به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شدند که برای دقت بیشتر، ابتدا موجک‌های مختلف مانند Haar، db4، Sym2 و Coif4 بر روی این داده‌ها اعمال شدند و داده‌های به‌دست‌آمده به‌عنوان ورودی شبکه عصبی در نظر گرفته شدند. لازم به ذکر است که در این تحقیق، از شبکه‌های پیش‌خور استفاده شد و داده‌ها به دو گروه ۷۵ درصد (آموزش و اعتبارسنجی) و ۲۵ درصد (تست) تقسیم شدند. متداول‌ترین توابع فعال، توابع سیگموئیدی و خطی بودند که از آنها استفاده شد. نتایج آنالیز آماری برای هر موجک در جدول‌های ۲، ۳ و ۴ ارائه شده‌اند.

جدول ۲- آنالیز آماری مدل شبکه عصبی - موجک برای رقم

مامایی با اعمال موجک coif4				
رقم	پارامتر شبیه‌سازی شده	نرون‌های لایه پنهان	R	
			آموزش	تست
	مدول الاستیسیته	۵	۰/۹۲۰۳	۰/۹۵۲۳
مامایی	نیروی شکست	۷	۰/۹۸۰۷	۰/۹۷۴۵
	انرژی مصرفی	۴	۰/۹۴۶۳	۰/۸۳۷۴

جدول ۳- آنالیز آماری مدل شبکه عصبی - موجک برای رقم

شاهرود با اعمال موجک coif4				
رقم	پارامتر شبیه‌سازی شده	نرون‌های لایه پنهان	R	
			آموزش	تست
	مدول الاستیسیته	۸-۶	۰/۸۴۳۵	۰/۹۳۶۲
شاهرود	نیروی شکست	۵	۰/۹۵۴۵	۰/۹۶۰۶
	انرژی مصرفی	۶	۰/۹۱۵۲	۰/۹۴۰۵

جدول ۴- آنالیز آماری مدل شبکه عصبی - موجک برای رقم

ربیع با اعمال موجک coif4				
رقم	پارامتر شبیه‌سازی شده	نرون‌های لایه پنهان	R	
			آموزش	تست
	مدول الاستیسیته	۴	۰/۹۲۷۴	۰/۹۵۹۳
ربیع	نیروی شکست	۸	۰/۹۵۵۸	۰/۹۷۱۴
	انرژی مصرفی	۴-۷	۰/۸۸۰۵	۰/۹۲۷۵

نتایج ارزیابی متقابل حاکی از برتری موجک Coif4 بود. با استفاده از ضریب همبستگی مشخص شد که شبکه عصبی مصنوعی-موجک برای نگاشت غیرخطی روشی مناسب است و می‌توان از آن برای پیش‌بینی متغیرهای نیروی شکست، مدول الاستیسیته و انرژی مصرفی مغز بادام به کمک دو پارامتر ورودی (سه سطح رطوبت و سه سطح سرعت بارگذاری) استفاده نمود. نتایج پژوهش دقت بالای شبکه عصبی-موجک را نشان داد به طوری که برای رقم مامایی شبکه عصبی با آرایش ۱-۵-۲ با $R=0/9523$ ، آرایش ۱-۷-۲ با $R=0/9745$ ، آرایش ۱-۴-۲ با $R=0/8374$ برای مدول الاستیسیته، نیروی شکست و انرژی مصرفی بهترین پیش‌بینی را داشت. برای رقم شاهرود، شبکه عصبی با آرایش ۱-۶-۲ با $R=0/9362$ ،

غیرخطی توانا می‌باشد، بنابراین استفاده از مدل شبکه عصبی می‌تواند به‌عنوان راهکاری مفید برای حل این گونه مسائل باشد و نیز با به‌کارگیری تبدیل موجک، تمام ویژگی‌های سیگنال نمایان می‌شود و این خود باعث افزایش دقت مدل می‌شود. بنابراین استفاده از شبکه عصبی - موجک با توجه به ماهیت مسأله می‌تواند بسیار مؤثر واقع شود.

منابع

1. Aktas, T. Polat, R. and Atay, U. 2007. Comparison of mechanical properties of some selected almond cultivars with hard and soft shell under compression loading. *Journal of Food Engineering*, 30: 773-789.
2. Alidoosti Shahraki, M. Azimi, V. and Sharifi Bonab, S. 2013. Comparison of Artificial neural network and Wavelet Neural Network for estimation of Effective precipitation by Meteorological Data. Second International Conference in Modeling of Water, Soil, Atmosphere and Plant. 16 p. (In Farsi)
3. Altuntas, E. Gerçekcioglu, R. and Kaya, C. 2010. Selected mechanical and geometric properties of different almond cultivars. *International Journal of Food Properties*, 13(2): 282-293.
4. ASAE Standard. 1998. Compression test of food materials of convex shape. ASAE S368. 554-556.
5. Aydin, C. 2003. Physical properties of almond nut and kernel. *Journal of Food Engineering*, 60: 315- 320.
6. FAO. 2011. FAOSTAT database. <http://faostat.fao.org/faostat>.
7. Henry, Z. A. Zhang, H. and Onkos, D. O. 2000. New model for elastic behavior of cellular material. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76: 399-408.
8. Kamali, M. Razavi, S. J. Sadeghi, M. and Shafaei, S. M. 2015. Modeling moisture absorption kinetics of barley grain using viscoelastic model and neural network. *Journal of Agricultural Machinery*, 5(2): 270-280. (In Farsi)
9. Kashaninejad, M. Mortazavi, A. Safakordi, A. and Tabil, L. G. 2005. Some physical properties of Pistachio (*Pistachio vera L.*) nut and its kernel. *Journal of Food Engineering*, 72(1): 30-38.
10. Khayati, S. and Chayjan-Amiri, R. 2016. Prediction of some thermal, physical and mechanical properties of terebinth fruit after semi-industrial continuous drying using artificial neural networks. *Journal of food*

آرایش ۲-۵-۱ با $R=0/9606$. آرایش ۲-۶-۱ با $R=0/9405$ بهترین پیش‌بینی را برای مدول الاستیسیته، نیروی شکست و انرژی مصرفی را نشان داد و رقم ربیع با آرایش ۲-۴-۱ با $R=0/9593$. آرایش ۲-۸-۱ با $R=0/9714$. آرایش ۲-۴-۷-۱ با $R=0/9275$ بهترین پیش‌بینی را برای مدول الاستیسیته، نیروی شکست و انرژی مصرفی نشان داد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش در وضعیت قرارگیری افقی بادام، نیروی شکست شبه‌استاتیکی مغز سه رقم بادام به نام‌های مامایی، ربیع و شاهرود دوازده در سه سطح رطوبتی (۵/۵٪، ۱۵٪ و ۲۵٪ بر پایه تر) و سه سرعت بارگذاری (۵، ۱۵ و ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه) تعیین و بررسی شد. برای شناخت اثرات عوامل اعمال شده بر پارامترهای خروجی مورد نظر، مطالعه‌ای انجام شد و اثر رقم‌های مورد استفاده در مقابل سه سطح رطوبت انتخابی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. به این ترتیب نشان داده شد که پارامترهای مورد بررسی در عمل چه نقشی را از نظر تأثیر بر روی هم طبق هدف این پژوهش ایفا می‌نمایند تا بتوان در آینده با استفاده از این نتایج از کمیت و کیفیت اثرات متغیرها بر روی هم استفاده و در تصمیم‌گیری‌ها از حد و مرز هر یک اطلاع کافی داشت. در بخش دوم، هدف طراحی یک مدل پیش‌بینی هوشمند به منظور تعیین پارامترهای خروجی با استفاده از روش شبکه عصبی - موجک بود تا بتوان با آموزش شبکه در مدل هوشمند از آن در به‌دست آوردن خروجی‌های مورد نظر با داشتن ارقام و رطوبت‌های مورد نظر با دقت و سرعت بالا استفاده نمود. بنابراین یک مدل شبکه عصبی - موجک طراحی شد.

در نتیجه‌گیری نهایی شبکه عصبی - موجک با آرایش ۱-۳-۹ با $R=0/9497$. آرایش ۱-۳-۶-۱ با $R=0/9508$ و آرایش ۱-۳-۵-۱۰ با $R=0/8988$ بهترین پیش‌بینی را برای مدول الاستیسیته، نیروی شکست و انرژی مصرفی داشت. با توجه به این که پارامترهای مورد بررسی پدیده‌هایی متغیرند، پیش‌بینی آنها بسیار مشکل است. بنابراین استفاده از روشی که بتواند به‌صورت هوشمند با داده‌های موجود آموزش دیده و مقادیر هدف را با دقت بالایی پیش‌بینی نماید لازم و ضروری است. با توجه به این که مدل شبکه عصبی - موجک در پیش‌بینی پدیده‌های

23. Rohani, A. Saedi, S. I. Gerailue, H. and Aghakhani, M. H. 2015. Prediction of lateral surface, volume and sphericity of pomegranate using MLP artificial neural network. *Journal of Agricultural Machinery*, 5(2): 292-301. (In Farsi)
24. Salcilik, K. 2009. Some physical properties of hempseed, *Bio system engineering*, 86(2): 191-198.
11. Khazaie, G. Rasekh, M. and Borgheie, A. 2003. Physical and mechanical properties of almond and its kernel. *Iranian Journal of Agricultural Science*, 9(3): 11-33. (In Farsi)
12. Kia, M. 2011. *Soft computational in MATLAB First Edition*. Kian Rayan Sabz Press. 141 p. (In Farsi)
13. Kilickan, A. and Guner, M. 2008. Physical properties and mechanical behavior of olive fruits (*Olea europaea*, L.) under compression loading. *Journal of Food Engineering*, 87: 222-228.
14. Kisi, O. 2008. River flow forecasting and estimation using different artificial neural network techniques. *Hydrology Research*, 39: 27-40.
15. Kojima, T. 1983. Mechanical properties and resonant vibration characteristics of fruits. *Bulletin of Faculty of Agriculture, Saga University*.
16. Kosma, A. and Cunningham, H. 1962. Tables for calculating the compressive surface stresses and deflections in the contact of two solid elastic bodies whose principle planes of curvature do not coincide. *International Journal of Industrial Mathematics*, 12: 31-40.
17. Krishna, B. Satyaji Rao, Y. R. and Nayak, P. C. 2011. Time Series Modeling of River Flow Using Wavelet Neural Networks, *Journal of Water Resource and Protection*, 3: 50-59.
18. Madam, B. Rahemi, M. Mousavi, A. and Martinez-Gomez, P. 2011. Evaluation of the behavior of native Iranian almond species as rootstocks. *International Journal of Nuts and Related Sciences*, 2(3): 29-34.
19. Menlik, T. Özdemir, M. B. and Kirmaci, V. 2010. Determination of freeze-drying behaviors of apples by artificial neural network. *Expert Systems with Applications*, 37: 7669-7677.
20. Mohsenin, N. N. 1986. *Physical Properties of Plant and Animal Materials*. 2nd Edition. Gordon and Breach Science Publisher, New York.
21. 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. *Journal of Expert Systems with Applications*, 37(10): 7205-7212.
22. Reshadsedghi, A. and Mahmoudi, A. 2013. Detection of Almond Varieties Using Impact Acoustics and Artificial Neural Networks. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 5: 1008-1017.

