نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، مجله منابع طبیعی ایران
دوره ۶۷، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۲
ص۳۰۷-۳۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۳/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۹/۰۲

عوامل تعیین‌کنندهٔ مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی تختهٔ خرده‌چوب بر اساس داده‌های اطلاعات پایه

❖ **علی بیات کشکولی***؛ دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

چکیده

مقدار مدول الاستیسیته و گسیختگی تختهٔ خرده‌چوب بر اساس عوامل تولیدی کنترل می‌شود. حال سؤال اساسی این است که عوامل تعیین‌کنندهٔ خواص خمشی تختهٔ خرده‌چوب کدام‌اند؟ داده‌های پایهٔ این تحقیق شامل ۱۳ متغیر مشترک اندازه‌گیری‌شده با ۱۰۰ تکرار در منابع علمی معتبر داخلی است. روش‌های مدل‌سازی خطی و مدل‌سازی غیرخطی آزمون گاما، ام، و الگوریتم ژنتیک و شبکهٔ عصبی برای آزمون سؤال استفاده شد. عوامل تعیین‌کنندهٔ خواص خمشی تختهٔ خرده‌چوب شاملِ ۱. نوع مواد مصرفی، ۲. جرم مخصوص خشک مواد اولیه با میانگین‌گیری ساده، ۳. جرم مخصوص خشک مواد اولیه با میانگین‌گیری وزنی، ٤. مقدار درصد چسب اورهٔ فرمالدئید، ۵. جرم مخصوص تختهٔ تولیدی، ٦. زمان پرس، ۷. دمای پرس، و ۸. فشار پرس هستند و به غیر از این عوامل، ضخامت تختهٔ تولیدی برای مدول گسیختگی و نیز درصد اختلاط مواد چوبی و منابع لیگنوسلولزی غیرچوبی و مقدار درصد کلرید آمونیوم برای مدول الاستیسیته مهم‌اند. مدل‌های الگوریتم ژنتیک و شبکهٔ عصبی نشان می‌دهد که عوامل تعیین‌کنندهٔ مذکور مخصوصاً جرم مخصوص خشک مواد اولیه با میانگین‌گیری وزنی برای مدول گسیختگی و درصد چسب برای مدول الاستیسیته قابلیت کنترل کیفی تختهٔ خرده‌چوب را دارند و برخی عوامل دیگر را می‌توان ثابت در نظر گرفت. درصد مطلق خطای مدل پیش‌بینی شبکهٔ عصبی برای مدول گسیختگی برابر ٥/٦٤٤ و برای مدول الاستیسیته برابر ٤/٩١ است.

واژگان کلیدی: آزمون گاما، الگوریتم ژنتیک، تختهٔ خرده‌چوب، شبکهٔ عصبی مصنوعی، مدول الاستیسیته، مدول گسیختگی.

* نویسندهٔ مسئول تلفن: ۰۹۱۷۷۱۵۳۹۷۵
Email: ali.bayatkashkoli@gmail.com

مقدمه

کارخانه‌های تختهٔ خرده‌چوب در مناطق مختلف ایران فعال‌اند و از گسترهٔ وسیعی از مواد اولیه استفاده می‌کنند. معمولاً منابع لیگنوسلولزی این کارخانه‌ها در شمال کشور مخلوطی از گونه‌های جنگلی، در شمال غرب کشور از گونه‌های صنوبر، و در سایر مناطق ایران، منابع لیگنوسلولزی دیگری مانند ضایعات کشاورزی، شاخه، و سرشاخه‌های باغی است. در این صورت، خط تولید آن‌ها در شرایط متفاوت کنترل می‌شوند. هدف تمام این کارخانه‌ها تولید محصول با کیفیت یکسان در شرایط متفاوت است. اگر خط تولید در شرایط متفاوت کنترل و تنظیم نشود، کیفیت تولید مطلوب نخواهد بود و باعث افزایش ضایعات و کاهش رقابت‌پذیری محصولات کارخانه می‌شود. کیفیت یکسان به این معنی است که کارخانهٔ تولیدکننده از باگاس نیاز به خواص خمشی معین و کارخانهٔ تولیدکننده از گونه‌های جنگلی نیاز به مقاومت در محدودهٔ دیگر دارد. بنابراین، این محدودهٔ مقاومتی برای برطرف‌کردن نیاز مشخص بازار ثابت نگه داشته می‌شود و برای این هدف از عوامل تعیین‌کنندهٔ موجود در خط تولید استفاده می‌کنند. تحقیقات اولیهٔ زیادی در زمینهٔ تولید تختهٔ خرده‌چوب با مواد و شرایط متنوع انجام گرفته است. این اطلاعات، امکان ساخت تختهٔ خرده‌چوب با مقاومت استاندارد یا تأثیر مواد اولیهٔ متفاوت و متغیرهای ساخت بر مقاومت را نشان می‌دهد. گسترهٔ وسیعی از این تحقیقات داخلی، شرایط و مواد متنوعی را نشان می‌دهد. گونه‌های صنوبر و جنگلی، شاخه‌ها و سرشاخه‌های باغی، و ضایعات کشاورزی مانند باگاس، کاه، و کلش، مواد اولیهٔ لیگنوسلولزی استفاده‌شده در این تحقیقات بوده‌اند. مواد اولیهٔ غالب این تحقیقات گونهٔ صنوبر است، ولی جرم مخصوص مواد اولیهٔ مصرفی و کل کیک خرده‌چوب در برخی تحقیقات ذکر نشده بود. فراوانی رطوبت خرده‌چوب اولیه در بیشتر موارد ۳ درصد بوده، ولی ۱ درصد نیز استفاده شده است. رطوبت کیک خرده‌چوب این تحقیقات بین ۱۰ تا ۱۳ درصد است، ولی معمولاً کیک خرده‌چوب با رطوبت ۱۲ درصد بیشتر استفاده می‌شود. چسب اورهٔ فرمالدئید در محدودهٔ ۷ تا ۱۲ درصد استفاده شده که با مقدار ۱۰ تا ۱۲ درصد بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است. مقدار ۲ درصد هاردنر کلرید آمونیوم بیشتر از ۱ درصد استفاده شده است. ضخامت تخته‌های تولیدی در محدودهٔ بین ۱۲ تا ۱۶ میلی‌متر است، ولی تخته‌های با ضخامت بین ۱۵ تا ۱۶ میلی‌متر بیشتر ساخته شده‌اند. جرم این تخته‌های آزمایشگاهی بین ۰/۵۲ تا ۰/۷۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب با فراوانی ۰/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. تختهٔ خرده‌چوب این تحقیقات با زمان پرس ۴ تا ۸ دقیقه و با فراوانی ۷ دقیقه، دمای پرس ۱۴۰ تا ۱۸۵ درجهٔ سانتی‌گراد و با فراوانی ۱۷۰ درجهٔ سانتی‌گراد، و فشار پرس ۳۰ تا ۱۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و با فراوانی ۳۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع ساخته شده است. برخی از این تحقیقات که حاوی این اطلاعات‌اند بدین شرح‌اند [۱-۱۶].

تحقیقات داخلی دربارهٔ مدل‌سازی در صنایع چوب و کاغذ محدود به نرم‌افزارهای آماری است و اطلاعات در زمینهٔ مدل‌سازی غیرخطی وجود نداشت. مدل‌هایی با استفاده از روش رگرسیون گام‌به‌گام برای تخته‌های ساخته‌شده با شرایط مختلف، گرادیان رطوبت، ابعاد خرده‌چوب، درجهٔ حرارت، و زمان پرس پیش‌بینی شده است. این مدل نشان داد که ابعاد خرده‌چوب مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر مقاومت

خمشی تختهٔ خرده‌چوب است و با افزایش ضریب کشیدگی خرده‌چوب مقاومت خمشی تختهٔ خرده‌چوب بهبود می‌یابد. دو عامل ابعاد خرده‌چوب و گرادیان رطوبت به ترتیبِ شدتِ تأثیر مثبت وارد مدل نهایی مدول الاستیسیته شدند [۱۷].

معادله‌های رگرسیون چندمتغیرهٔ مربوط به خواص مکانیکی سه متغیر مستقل درصد چسب و دانسیتهٔ تختهٔ خرده‌چوب و ضریب کشیدگی خرده‌چوب پیش‌بینی شده است. معادلهٔ درجه دو برای هیچ‌کدام از ویژگی‌های مکانیکی در سطح ۱ درصد معنی‌دار نبوده است، ولی معادلات خطی و نمایی معنی‌دار بوده‌اند. معادلهٔ نمایی در مقایسه با معادلهٔ خطی خواص مکانیکی تختهٔ خرده‌چوب را با درصد خطای کمتری پیش‌بینی می‌کند [۱۸].

مسئلهٔ بیشینه‌کردن تابع‌های چگالی چاپ و میزان کیفیت پوشش جوهر در کاغذهای بسته‌بندی، در قالب یک برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه فرموله و سپس با بهره‌گیری از روش فازی حل و سطوح بهینه تعیین شده است [۱۹]. تجزیهٔ همبستگی و رگرسیون چندمتغیره برای تعیین مؤثرترین متغیرهای فرایندی استفاده شد و میزان تأثیر متغیرها بر مقاومت به ترکیدن و پارگی کاغذ روزنامه بررسی و سرانجام این دو ویژگی آن‌ها از روی متغیرهای مؤثر پیش‌بینی شد. مدل‌های مناسب و بی‌شماری برای پیش‌بینی و کنترل مقاومت به ترکیدن کاغذ روزنامه تهیه شد [۲۰]. خصوصیات براقیت و کدری خمیرکاغذ رنگ‌زدایی‌شدهٔ پهن‌برگان با استفاده از مدل‌سازی رگرسیون چندمتغیره برای کنترل بهینهٔ کارخانهٔ چوب و کاغذ مازندران بررسی شد. نتایج این مدل‌ها ابزار مناسبی برای کنترل بهینهٔ فرایند است [۲۱].

روش‌های مدل‌سازی خطی و غیرخطی کاربرد زیادی در بهینه‌سازی فرایند تولید دارد و در بسیاری از تحقیقات خارجی گزارش شده است. فرایندهای تختهٔ خرده‌چوب نیز مورد توجه بوده که برخی از این تحقیقات به این شرح است.

کاربرد شبکهٔ عصبی در کنترل متغیرهای فرایند تختهٔ خرده‌چوب بررسی شده است. شبکهٔ عصبی ابزار مؤثری برای مدل‌سازی فرایند تولید است و داده‌های واقعی را شبیه‌سازی می‌کند. داده‌های روش‌های شبکهٔ عصبی با داده‌های به‌دست‌آمده از متغیرهای فرایند کارخانهٔ تختهٔ خرده‌چوب با نمودار بررسی شد. مدل شبکهٔ عصبی برای چسبندگی داخلی بر اساس محدوده‌ای از داده‌های مشخص ضخامت، دانسیته، مقدار رطوبت، واکشیدگی، و جذب آب تختهٔ خرده‌چوب تهیه شد. معیارهای محاسبه‌شده برای آزمون شبکهٔ عصبی همانند معیارهای آماری کنترل فرایند مورد قبول بود [۲۲].

خصوصیات مکانیکی تختهٔ خرده‌چوب با به‌کاربردن روش شبکهٔ عصبی پیش‌بینی و سپس با نتایج رگرسیون گام‌به‌گام مقایسه شد. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی تختهٔ خرده‌چوب‌های با ضخامت‌های متفاوت ۹۳ کارخانه در اسپانیا تعیین شد. ضخامت و خصوصیات فیزیکی به‌دست‌آمده وارد شبکهٔ عصبی شد و از طرف دیگر خصوصیات مکانیکی تختهٔ خرده‌چوب پیش‌بینی شد. مدل‌های شبکهٔ عصبی به‌دست‌آمده در مقایسه با مدل‌های رگرسیونی گام‌به‌گام سازگاری بیشتری با داده‌های واقعی دارند [۲۳].

مدول الاستیسیته و گسیختگی چوب بلوط تیمارشدهٔ حرارتی با روش منطق فازی پیش‌بینی شد. مقاومت نمونه‌های چوب بلوط تیمارِ حرارتی‌شده اندازه‌گیری و با تجزیه و تحلیل آماریِ گام‌به‌گام ارزیابی شدند. ورودی مدل منطق فازی خروجی این تجزیه و تحلیل آماری است. مدل منطق فازی می‌تواند مقدار مدول الاستیسیته و گسیختگی نمونه‌های آزمونی را با دقت بالا پیش‌بینی کند. این

مدل به‌طور ویژه می‌تواند در کارخانه‌های صنعت چوب به‌کار برده شود [۲۴].

چسبندگی داخلی داده‌های مربوط به متغیرهای فرایند تخته‌فیبر نیمه‌سنگین با روش تجزیه و تحلیل آماری گام‌به‌گام، مدل‌سازی شده و دقت مدل پیش‌بینی چسبندگی داخلی با روش‌های الگوریتم ژنتیک و شبکهٔ عصبی افزایش داده شده است. این روش باعث می‌شود تا متغیرهای انتخاب‌شده کارایی پیش‌بینی را به‌علت نبود متغیرهای غیرمؤثر بهبود ببخشند. دقت و پیش‌بینی روش الگوریتم ژنتیک با متغیرهای انتخاب‌شده بیشتر از نتایج الگوریتم ژنتیک بدون انتخاب متغیر است. البته مدل‌های حاصل از تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی تحقیق نتایج بهتری از این روش و روش شبکهٔ عصبی دارد [۲۵].

اثر زاویهٔ الیاف بر روی مدول گسیختگی و الاستیسیتهٔ کاج اسکات با منطق فازی پیش‌بینی شده است. مدل منطق فازی بر اساس زاویهٔ الیاف این دو مقاومت را با دقت بالا پیش‌بینی می‌کند. کارخانه‌های چندسازهٔ چوبی می‌توانند از این روش استفاده کنند [۲۶].

خصوصیات فیزیکی تخته‌فیبر با دانسیتهٔ متوسط با روش شبکهٔ عصبی پیش‌بینی شده است. مدل‌های پیش‌بینی شبکهٔ عصبی کارایی تولید این تخته‌ها را افزایش می‌دهد و سرعت بالایی دارد [۲۷].

تأثیر متغیرهای فرایند تولید کارخانهٔ کاغذسازی مازندران بر روی مقاومت به پارگی کاغذ روزنامه و کاغذ چاپ و تحریر با استفاده از مدل‌سازی الگوریتم ژنتیک و شبکهٔ عصبی بررسی شد. ۱۶ متغیر از ۱۶۵ متغیر وارد مدل‌های شبکهٔ عصبی شدند. مدل‌های به‌دست‌آمده دقت مناسبی داشتند [۲۸].

مدلی بر اساس منطق فازی برای تعیین مدول الاستیسیته و گسیختگی تختهٔ فلیک ایجاد شده است. این مقاومت‌ها در کارخانه‌ها با روش‌های تجربی پرهزینه محاسبه می‌شود که نیاز به زمان دارد. ولی مدل منطق فازی برای فرایند این محصول با دقت بالا ایجاد شد و کارخانه‌های چندسازه‌ای می‌توانند از این روش استفاده کنند [۲۹].

چسبندگی داخلی تختهٔ خرده‌چوب با به‌کاربردن روش شبکهٔ عصبی پیش‌بینی شده است. شناسایی پارامترهای مؤثر در کنترل فرایندهای کارخانه‌ها مشکل است. روش شبکهٔ عصبی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی مقاومت تختهٔ خرده‌چوب توسعه داده شده است و با دقت بالا مقدار چسبندگی داخلی تختهٔ خرده‌چوب تولیدی کارخانه‌ها را پیش‌بینی می‌کند [۳۰].

روش‌های مدل‌سازی خطی مانند مدل‌های گام‌به‌گام رگرسیون چندمتغیرهٔ خطی و غیرخطی مانند الگوریتم ژنتیک و شبکهٔ عصبی کاربرد زیادی در کنترل فرایندهای کارخانه‌های چندسازهٔ چوبی مانند تختهٔ خرده‌چوب و تختهٔ فیبر دارند و با این روش‌ها می‌توان متغیرهای تعیین‌کنندهٔ خصوصیات مکانیکی یا فیزیکی را شناسایی و بر اساس آن مدل‌سازی کرد. اطلاعات پایه‌ای زیادی در منابع داخلی دربارهٔ عوامل تأثیرگذار بر مدول الاستیسیته و گسیختگی وجود دارد. حال این سؤال اساسی مطرح می‌شود که عوامل تعیین‌کنندهٔ این خصوصیات مکانیکی که وارد مدل خطی و غیرخطی می‌شوند کدام‌اند و کدام‌یک از این متغیرها، در کنترل مدول الاستیسیته و گسیختگی تأثیر بیشتری دارد. بنابراین، هدف این تحقیق ایجاد مدل و تعیین عوامل تأثیرگذار و کنترل‌کنندهٔ مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی است.

مواد و روش‌ها

شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک دو ابزار اصلی در این مقاله برای شناسایی عوامل تعیین‌کنندهٔ خواص خمشی تختهٔ خرده‌چوب‌اند. شبکه‌های عصبی مصنوعی نوعی مدل‌سازی ساده‌انگارانه از

سیستم‌های عصبی واقعی‌اند که کاربرد فراوانی در حل مسائل مختلف در علوم دارند. یکی از روش‌های کارآمد در حل مسائل پیچیده، شکستن آن به زیرمسائل ساده‌تر است که هرکدام از این زیربخش‌ها به نحو ساده‌تری قابل درک و توصیف باشند. روشی برای محاسبه وجود دارد که بر پایهٔ اتصال به هم پیوستهٔ چندین واحد پردازشی ساخته می‌شود. شبکهٔ عصبی مصنوعی از تعداد دلخواهی سلول یا گره یا واحد یا نرون تشکیل می‌شود که مجموعهٔ ورودی را به خروجی ربط می‌دهند. در واقع، یک شبکه، مجموعه‌ای از این ساختارهای ساده است که در کنار یکدیگر سیستم پیچیدهٔ نهایی را توصیف می‌کنند. شبکه‌ها انواع مختلفی دارند، اما همگی آن‌ها از این دو مؤلفه تشکیل می‌شوند: ۱. مجموعه‌ای از گره‌ها؛ هر گره در واقع واحد محاسباتی شبکه است که ورودی‌ها را می‌گیرد و بر روی آن‌ها پردازش انجام می‌دهد تا خروجی به‌دست بیاید. ۲. اتصالات بین گره‌ها؛ این اتصالات نحوهٔ گذر اطلاعات بین گره‌ها را مشخص می‌کند. در اینجا، یک مدل شبکهٔ عصبی مصنوعی وجود دارد که با داده‌های تجربی، تابع رابطه بین عوامل را ایجاد می‌کند. الگوریتم ژنتیک، شبکهٔ عصبیِ آموزش‌دیده است و پاسخ مطلوب و مناسب را برای ترکیب عوامل مربوطه جست‌وجو می‌کند. الگوریتم ژنتیک، روش حل مسئله با الهام از نظریهٔ تکامل است که شبیه‌سازی یک فرایند تکامل طبیعی است. الگوریتم ژنتیک در حل بسیاری از مشکلات از قبیل مدل‌سازی، برازش منحنی، طبقه‌بندی، و انتخاب متغیر برای ترازکردن خط تولید موفق بوده است. به‌طور خاص، الگوریتم ژنتیک ابزاری بسیار کارآمد برای انتخاب متغیر در کنترل فرایند است. هر متغیر در روش الگوریتم ژنتیک با یک کد کامپیوتری در یک بردار نشان داده می‌شود و یک سلول برای هریک از متغیرها ایجاد می‌شود. برای هر کروموزوم یا سلول، یک پاسخ مناسب و منطبق با وضعیت ارزیابی آن داده می‌شود که معیاری برای هدایت الگوریتم ژنتیک به هدف مطلوب و ایجاد یک پاسخ جدید است. ترکیب جدیدی از پاسخ‌ها با مقایسهٔ متقاطع بین کروموزوم‌ها ایجاد می‌شود. اعتبارسنجی در روش الگوریتم ژنتیک بر اساس گروه‌های حذف‌شده است.

تعداد ۱۳ متغیر مشترک در منابع علمی معتبر داخلی برای خصوصیات مدول الاستیسیته و گسیختگی بررسی شده است. این متغیرهای مشترک به این شرح‌اند:

A. نوع مواد مصرفی، B. رطوبت خرده‌چوب، C. جرم مخصوص خشک مواد اولیه با میانگین‌گیری ساده، D. درصد اختلاط مواد چوبی و منابع لیگنوسلولزی غیرچوبی، E. جرم مخصوص خشک مواد اولیه با میانگین‌گیری وزنی، F. مقدار درصد چسب اورهٔ فرمالدئید، G. مقدار درصد کلرید آمونیوم، H. رطوبت کیک خرده‌چوب، I. ضخامت تختهٔ تولیدی، J. جرم مخصوص تختهٔ تولیدی، K. زمان پرس، L. دمای پرس، و M. فشار پرس. این متغیرها در این مطالعات اندازه‌گیری شده بود و باید داده‌های مربوط به این دو خصوصیت انتخاب و سپس متغیرهای اندازه‌گیری‌شده در تحقیقات مختلف یک‌به‌یک متناظر همدیگر و همچنین متناسب با این خصوصیات انتخاب شوند. در نهایت، دادهٔ متناظر این متغیرها به تعداد ۸۹ تکرار برای مدول الاستیسیته و ۱۰۹ تکرار برای مدول گسیختگی انتخاب شدند. تجزیه و تحلیل داده‌ها به‌صورت خام باعث کاهش دقت می‌شود و داده‌های پایهٔ اندازه‌گیری‌شده در تحقیقات مختلف دارای دامنهٔ مقادیر مختلفی‌اند. بنابراین، تمام سری داده‌ها با استفاده از معادلهٔ ۱ بین صفر و یک نرمال شدند.

$$x_i = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \qquad (۱)$$

که در این رابطه x_i دادهٔ اندازه‌گیری‌شدهٔ یک

متغیر، x_{min} حداقل و x_{max} حداکثر دادهٔ اندازه‌گیری شدهٔ همان متغیر است.

داده‌های نرمال‌شده در دو مرحله شامل ۱. مدل گام‌به‌گام رگرسیون چندمتغیرهٔ خطی با نرم‌افزار آماری[1]، و ۲. مدل‌سازی غیرخطی با نرم‌افزار گاما[2] و متلب[3] استفاده شدند.

تعداد متغیرها با نرم‌افزار آماری محدود شدند و فقط آن‌هایی که وارد مدل رگرسیون خطی می‌شدند برای تجزیه و تحلیل‌های مرحلهٔ بعد استفاده شدند. در غیر این صورت زمان و توان محاسبات کامپیوتری محدود در اختیار بود و محاسبات ممکن نبود. محققان دیگر نیز به این مشکل توجه کرده‌اند [۳۱]. مدل‌های آماری یا خطی برای خواص خمشی (مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی) توسط روش مدل گام‌به‌گام رگرسیون چندمتغیرهٔ خطی ایجاد شد. این روش مدل‌های متفاوتی را برای هرکدام از خواص خمشی ارائه می‌دهد که یک مدل برای هرکدام انتخاب می‌شود. متغیرهای واردشده به این مدل برای هریک از خواص خمشی انتخاب می‌شوند. این متغیرهای انتخاب‌شده یا مؤثر از نظر آماری برای مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی با نرم‌افزار متلب آماده‌سازی شدند. سپس، با نرم‌افزار گاما، عدد گاما و خطای استاندارد آزمون گاما محاسبه و نمودارهای آزمون ام[4] و جدول الگوریتم ژنتیک[5] ایجاد شد.

آزمون گاما و ام، متغیرهای مؤثر و غیرمؤثر بر خواص خمشی را مشخص و معمولاً نتایج همدیگر را تأیید می‌کنند. سپس، الگوریتم ژنتیک، مدل‌هایی از کمترین گاما تا بیشترین گاما یا از بهترین حالت تا بدترین حالت را نشان می‌دهد. تعداد داده‌های آزمایش[6] و آزمون[7] مدل‌های شبکهٔ عصبی بر اساس بهترین مدل الگوریتم ژنتیک انتخاب می‌شود و محدودهٔ این دو داده بر اساس نمودار حاصل از نقطه‌ای که تغییرات گاما کم و خطی است مشخص می‌شود. داده‌های آزمایش از یک تا این نقطه و بقیهٔ آن‌ها، داده‌های آزمون است. مدل سریع و با کارایی مناسب BFGS[8] شبکهٔ عصبی بر اساس داده‌های تفکیک‌شدهٔ آزمایش، ایجاد می‌شود. ساختار شبکهٔ عصبی مصنوعی با تعداد گره‌ها در لایهٔ اول و دوم تشکیل و با حداقل خطای جمع میانگین مربعات آزمایش می‌شود. مقدار خطای مدل ایجادشده را می‌توان آزمود و در این حالت داده‌های واقعی و پیش‌بینی مشخص است. در نهایت، داده‌های آزمون بدون خروجی (مدول الاستیسیته و گسیختگی) تشکیل و آماده‌سازی می‌شود. مجدداً با داده‌های آزمون، مقدار خروجی بر اساس مدل ایجادشدهٔ داده‌های آزمایش پیش‌بینی می‌شود و می‌توان خروجی واقعی را با خروجی پیش‌بینی‌شده مقایسه کرد و دقیق‌ترین مدل ایجادشده از بین مدل‌های متفاوت را انتخاب نمود. همچنین دقت مدل‌های ایجادشده با روش شبکهٔ عصبی مصنوعی یا درصد مطلق خطای پیش‌بینی[9] را می‌توان به شرح رابطهٔ ۲ محاسبه کرد:

$$Mape = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{[Fi - Di]}{Di} * 100 \qquad (۲)$$

که در این رابطه n تعداد داده، Fi دادهٔ پیش‌بینی‌شده، و Di دادهٔ واقعی است.

آزمون گاما یک مدل‌سازی غیرخطی و ابزاری برای آنالیز است و اجازه می‌دهد تا رابطهٔ بین خروجی‌ها و ورودی‌ها در مجموعه داده‌های عددی آزمایش شود. این آزمون می‌تواند کمترین مقدار قابل محاسبهٔ میانگین مربعات خطا را برای هر مدل ارائه

1. SPSS: regression linear; Stepwise
2. Wingamma
3. MATLAB
4. M Test
5. Genetic Algorithm
6. Train
7. Test
8. Broyden-Fletcher-Goldfrab-Shanno
9. mean absolute percent errors (Mape)

بدهـد. آزمـون گامـا مقـدار خطـای برآوردشـده (یـا واریانس اشتباه) را از روی داده‌ها به‌صـورت مسـتقیم نشان می‌دهد [۳۲].

از این رو، برآورد خطایی، که به آن آزمـون گامـا اطلاق می‌شـود، مـی‌توانـد معـادل مجمـوع مربعـات اشتباهات غیرخطی در رگرسیون خطی در نظر گرفتـه شود. به‌طور فرض، آزمون گاما، که اگر دو نقطـهٔ x و x' بـا همـدیگر در فضـای ورودی متنـاظر بـا خروجی‌های y و y' بـه هـم نزدیـک شـوند بایـد در فضای خروجی نیز به هم نزدیک شـوند وگرنـه ایـن ناشی از اختلافی است که از نویزها (مانند بی‌دقتی در اندازه‌گیری، مؤثرنبودن ورودی بـر روی خروجـی، و ساده‌نبـودن روابـط بـین ورودی و خروجـی) ایجـاد می‌شوند. وقتی مقدار گاما صفر باشد، هیچ محدودیتی برای ساخت یک مدل خوب وجود ندارد، اما در واقع زمانی که مقدار گاما مثبت باشـد نتیجـهٔ کـار درسـت است، که در این حالت، نقاطی که دارای مقادیر کمتر در مقایسه با دیگر متغیرها هستند استفاده مـی‌شـوند. آزمون گاما خطای موجود در داده‌ها را بـا توجـه بـه بهترین مدل حاصل از داده‌ها برآورد می‌کند و مدلی با دقت زیاد ارائه می‌دهد [۳۳].

آزمون ام روش اندازه‌گیری برای بـرآورد قابلیـت اعتماد آمارهٔ گامای واریانس اشتباه است که بـا توجـه به داده‌های موجود با اسـتفاده از بـرآورد آمـارهٔ گامـا حاصل می‌شود. روش کار به‌صورت متـوالی اسـت و مراحـل مختلـف دارد. ایـن آزمـون بـرای نشـان‌دادن چگونگی به‌کارگیری مقـادیر مختلـف آمـارهٔ گامـا در بیشتر داده‌ها محاسبه می‌شود. در نهایت، اگـر داده‌هـا برای آزمون گاما کافی باشـد، بایـد خـط مجـانبی بـا واریانس حقیقـی خطـای محاسـبه‌شـده در خروجـی به‌دست آید. آزمون ام مراحلی به شرح زیر دارد: ابتدا کـل ترکیبـات (تمـام متغیرهـا) مـورد آزمـون قـرار می‌گیرند. سپس، به‌ترتیب یکـی از متغیرهـا حـذف و بقیهٔ متغیرها در آزمون قرار داده می‌شوند. این کار تـا جایی صورت می‌گیرد که هریک از متغیرها یک‌مرتبه کنار گذاشـته شـوند. مقـدار گامـای هرکـدام از ایـن ترکیبات که بیشترین مقدار را داشته باشد، یعنی متغیر حذف‌شده، مهم‌ترین متغیر است. اگر این مقدار گامـا حداقل باشد، متغیر کنارگذاشته‌شده کـم‌اهمیـت‌تـرین متغیر است.

برای یـک مجموعـه داده، نـرم‌افـزار ویـن گامـا، آزمون گاما را انجام می‌دهد و واریانس خطا را بـرای هر خروجی محاسبه می‌کند کـه بـرآوردی از خطـای میانگین مربعات حداقل خواهد بود و می‌تواند در یک مدل انعطاف‌پذیر به‌دست بیاید. بـرای تعیـین بهتـرین ترکیـب ورودی مـدل از بـین داده‌هـا، نـرم‌افـزار گزینه‌هایی مانند جاسازی کامـل[1] و الگـوریتم ژنتیـک دارد. تمام ترکیبات مختلف در جاسازی کامل در نظر گرفته می‌شود و معمولاً زمان زیادی نیاز دارد. چنـین عملی امکان انتخاب ورودی‌هـا از کـل ورودی‌هـا را میسر می‌کند. ایـن عمـل سـعی مـی‌کنـد بسـیاری از ورودی‌ها را برای به‌دست‌آوردن کوچک‌ترین مقـادیر مطلق گاما با هم ترکیب بکند که تعـداد آن بـه تعـداد نتایج تقاضـا بسـتگی دارد. امـا الگـوریتم ژنتیـک بـر اساس اصول ژنتیک، ترکیباتی از داده‌ها را می‌سـازد و روی آن‌ها عمل می‌کند تا بهترین ترکیب ورودی‌ها را حاصل کند. الگوریتم ژنتیک اغلب گزینهٔ خوبی برای روش‌های پیش‌بینی بـر مبنـای رگرسـیون اسـت کـه فضایی برای تمام ترکیبات مورد استفاده در الگـوریتم ژنتیک فراهم می‌کند تا بهترین ترکیب حاصل شود. با توجه به مبانی این روش و جواب‌های به‌دسـت‌آمـده، ترکیبی بهترین خواهد بود که کمتـرین مقـدار گامـا و در عین حال کمترین مقدار خطای استاندارد را داشته باشد.

1. Full embedding

نتایج و بحث

۱۳ متغیر متناظر و متناسب با مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی در مواد و روش‌ها موجود است و فقط باید متغیرهای مؤثر را انتخاب کرد.

۱۱ نوع مدل آماری برای مدول گسیختگی و ۱۲ نوع مدل آماری برای مدول الاستیسیته با روش مدل گام‌به‌گام رگرسیون چندمتغیرهٔ خطی مشخص شد. مدل‌های شمارهٔ ۱۱ و ۱۲ به‌عنوان نمونه به شرح زیر و معنی‌دارند.

مدل آماری گام‌به‌گام رگرسیون چندمتغیرهٔ خطی متغیرهای مدول گسیختگی (رابطهٔ ۳) و مدول الاستیسیته (رابطهٔ ۴) به این شرح است:

رابطهٔ (۳)

$$Y = - 0.519K - 0.5C + 0.332F + 0.268M – 0.265E + 0.419L + 0.364J – 0.55A + 0.366I$$

رابطهٔ (۴)

$$Y = 0.389E + 0.432F + 0.453G – 1.065A + 0.528J + 0.293M - 0.889C – 0.609D + 0.203L + 0.163K$$

حروف انگلیسی نام متغیرها هستند که در مواد و روش‌ها شرح داده شده‌اند. تعداد ۹ و ۱۰ متغیر به‌ترتیب برای مدول گسیختگی و الاستیسیته از کل ۱۳ متغیر، بر اساس مدل‌های گام‌به‌گام رگرسیون چندمتغیرهٔ خطی انتخاب شدند. عوامل تعیین‌کنندهٔ خواص خمشی تختهٔ خرده‌چوب شامل ۱. نوع مواد مصرفی، ۲. جرم مخصوص خشک مواد اولیه با میانگین‌گیری ساده، ۳. جرم مخصوص خشک مواد اولیه با میانگین‌گیری وزنی، ۴. مقدار درصد چسب اورهٔ فرمالدئید، ۵. جرم مخصوص تختهٔ تولیدی، ۶. زمان پرس، ۷. دمای پرس، و ۸. فشار پرس هستند و به غیر از این عوامل، ضخامت تختهٔ تولیدی برای مدول گسیختگی و همچنین درصد اختلاط مواد چوبی و منابع لیگنوسلولزی غیرچوبی و مقدار درصد کلرید آمونیوم برای مدول الاستیسیته اهمیت دارند. این متغیرهای انتخابی با نرم‌افزار وین گاما تجزیه و تحلیل شدند.

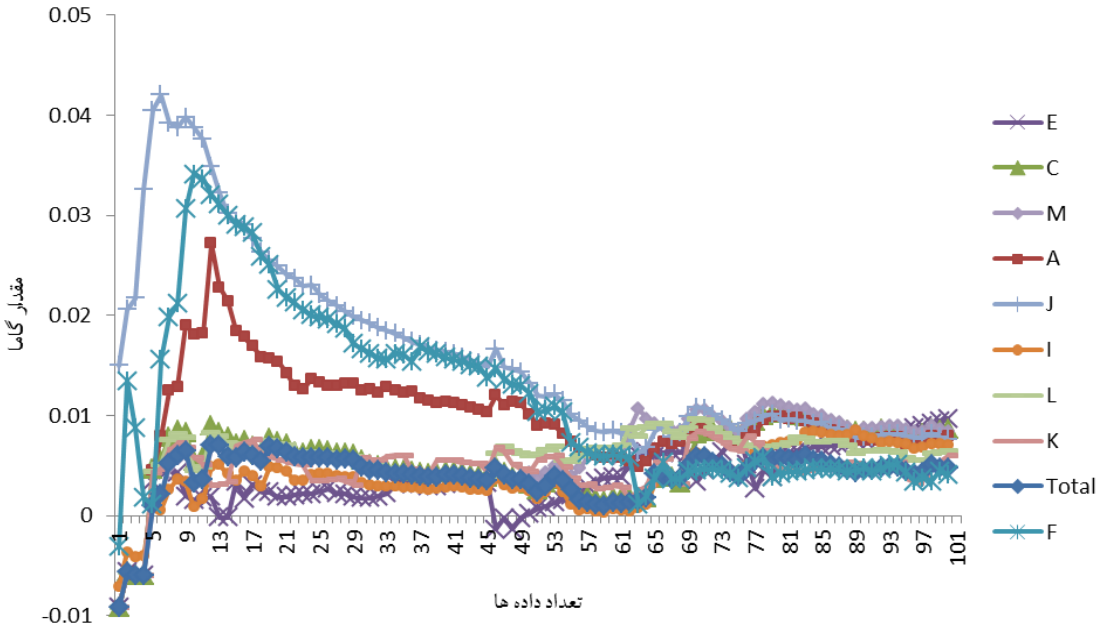
نتایج آزمون گاما شامل عدد گاما و خطای استاندارد مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته در جدول ۱ آمده است. معمولاً عدد گاما در تفسیر نتایج موجود در این جدول مهم است و خطای استاندارد را نیز در نظر می‌گیرند. به‌طور مثال، هر متغیری که حذف شود و اثر زیادی بر روی خصوصیات اندازه‌گیری‌شده داشته باشد، میزان گامای آن زیاد می‌شود، یعنی اثر بیشتری دارد. در این صورت، اگر مقدار گامای متغیری تغییر نکرد یا کمتر تغییر کرد، یعنی اثر این متغیر بر روی خصوصیات اندازه‌گیری‌شده ضعیف است. تفسیر خطای استاندارد مشابه عدد گاما است. حال با مراجعه به جدول ۱ مشاهده می‌شود که عدد گامای متغیر مقدار چسب برای مدول گسیختگی کمتر از حالت بدون حذف (ردیف یک) یعنی وجود همهٔ متغیرهاست و همچنین خطای استاندارد متغیرهای حذف‌شدهٔ مدول گسیختگی تقریباً تغییرات زیادی ندارد و اثر این متغیر در بین داده‌های مورد مطالعه بر روی مدول گسیختگی ضعیف است. بنابراین، می‌توان مقدار چسب مصرفی را در زمان ساخت تختهٔ خرده‌چوب ثابت در نظر گرفت. آماره‌های آزمون گاما (جدول ۱) نشان می‌دهد که متغیرهایی مانند مقدار هاردنر، دما، و فشار پرس برای مدول الاستیسیته را می‌توان همانند دیگر متغیرها مانند رطوبت خرده‌چوب و رطوبت کیک خرده‌چوب ثابت در نظر گرفت، زیرا خطای استاندارد و مخصوصاً عدد گامای آن‌ها از بقیهٔ مدل‌ها کمتر است و تأثیر زیادی بر خواص خمشی نداشته‌اند. از طرف دیگر، پارامترهایی مانند جرم مخصوص خشک مواد اولیه با میانگین‌گیری وزنی برای مدول گسیختگی و مقدار

درصد چسب اورهٔ فرمالدئید و جرم مخصوص تختهٔ تولیدی برای مدول الاستیسیته بیش از بقیهٔ متغیرها بر روی این خصوصیات تختهٔ خرده‌چوب تأثیر دارند، زیرا خطای استاندارد و به‌خصوص عدد گامای بالایی دارند. بنابراین، قابلیت کنترل این خصوصیات با این متغیرها بیشتر است.

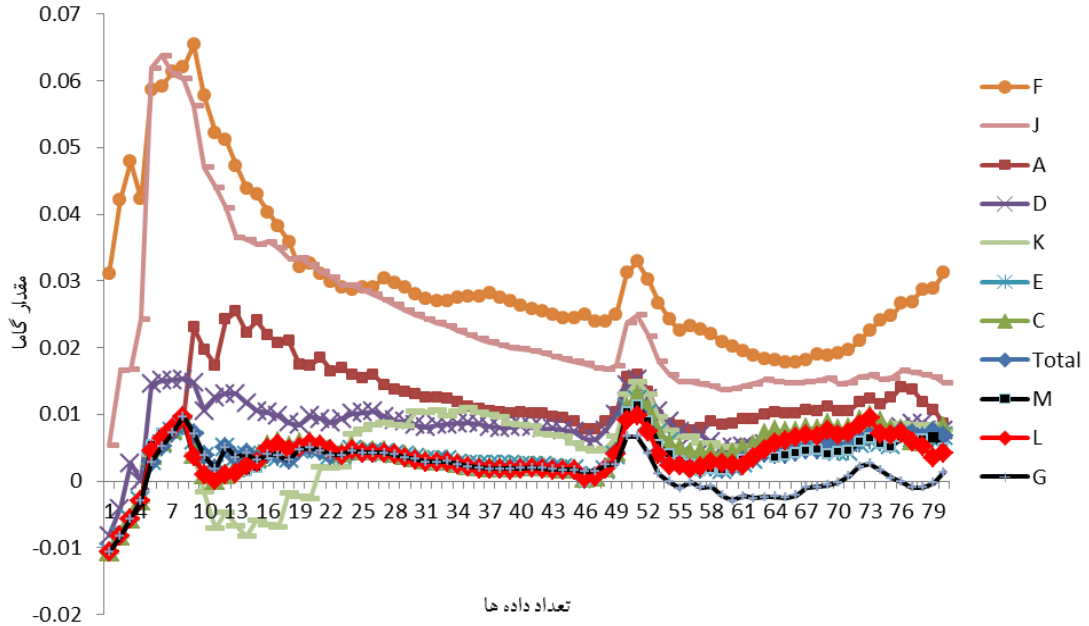
جدول ۱. مقادیر آماره‌های مربوط به آزمون گاما برای ترکیب متفاوت داده‌های ورودی مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته

ردیف	حذف متغیرهای ورودی مدول گسیختگی◆	آماره گاما	خطای استاندارد	ردیف	حذف متغیرهای ورودی مدول الاستیسیته◆	آماره گاما	خطای استاندارد
۱	بدون حذف	۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۳	۱	بدون حذف	۰/۰۰۶۷	۰/۰۰۷۹
۲	A	۰/۰۰۷۹	۰/۰۰۲	۲	A	۰/۰۰۸۶	۰/۰۰۹۴
۳	C	۰/۰۰۸۶	۰/۰۰۲	۳	C	۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۶۱
۴	E	۰/۰۰۹۷	۰/۰۰۵	۴	D	۰/۰۰۷۶	۰/۰۰۶۲
۵	F	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۴	۵	E	۰/۰۰۶۷	۰/۰۰۶۳
۶	I	۰/۰۰۷۰	۰/۰۰۳	۶	F	۰/۰۳۱۲	۰/۰۱۲۴
۷	J	۰/۰۰۷۶	۰/۰۰۲	۷	G	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۳۵
۸	K	۰/۰۰۶۰	۰/۰۰۵	۸	J	۰/۰۱۴۷	۰/۰۰۹۹
۹	L	۰/۰۰۶۴	۰/۰۰۴	۹	K	۰/۰۰۷۷	۰/۰۰۸۵
۱۰	M	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۳	۱۰	L	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۳۰
◆ نام متغیرها در مواد و روش ها تعریف شده است				۱۱	M	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۶۴

تفسیر آزمون گاما با مراحل بعدی همانند آزمون ام تکمیل می‌شود. نمودارهای آزمون ام، مقدار گامای متغیرها را با افزایش تعداد داده‌ها نشان می‌دهد و هرکدام از متغیرها که با افزایش تعداد نمونه‌ها گامای بیشتر یا اثر بیشتری دارد در قسمت بالاتر قرار می‌گیرد. شکل ۱ نتایج آزمون ام را نشان می‌دهد و تغییرات مقدار گامای متغیرها با افزایش تعداد داده‌ها مشخص است و از این رو روند نمودارها مهم است. معمولاً نتایج آزمون ام باید نتایج آزمون گاما را تأیید کند. شکل ۱ کم‌اثرترین متغیر بر روی مدول گسیختگی را که F است و نمودار آن در پایین‌ترین قسمت قرار دارد و مؤثرترین متغیر بر روی آن را که E، C، و M است و نمودار آن در بالاترین قسمت قرار دارد، نشان می‌دهد. نمودار E با افزایش تعداد داده‌ها تأثیر بیشتری را نشان می‌دهد، چون این متغیر در انتهای نمودارهای آزمون ام گامای بیشتری دارد. متغیرهایی که بیشترین اثر را بر مدول الاستیسیته دارند مانند F و J و کم‌اثرترین آن‌ها شامل G، L، و M، در شکل ۲ مشخص است. عدد گامای کل متغیرها شاخصی برای مقایسه با عدد گامای هرکدام از متغیرهاست. مقادیر جدول ۱ که مربوط به آزمون گاماست و شکل‌های ۱ و ۲، که مربوط به آزمون ام هستند، حداقل و حداکثر مقدار گاما را نشان می‌دهند و نتایج این دو آزمون تقریباً همدیگر را تأیید می‌کنند.



شکل ۱. مؤثرترین و کم‌اثرترین متغیر در مدول گسیختگی براساس آزمون ام



شکل ۲. مؤثرترین و کم‌اثرترین متغیر در مدول الاستیسیته براساس آزمون ام

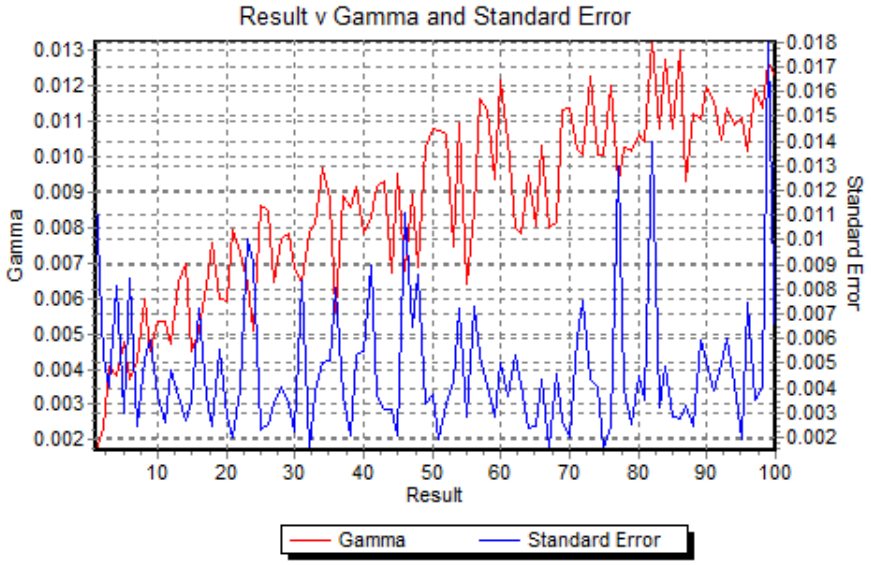
الگوریتم ژنتیک بهترین مدل را مشخص می‌کند و به‌ترتیب از بهترین تا بدترین مدل را نشان می‌دهد. جدول‌های ۲ و ۳ چندین مدل از بهترین مدل‌های بالای جدول الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهند و بهترین مدل نیز در ردیف اول و دوم مشخص است. این مدل‌ها کمترین مقدار گاما و خطای استاندارد را در مقایسه با بقیهٔ مدل‌ها دارند. جدول‌های ۲ و ۳ ترکیب متغیرها یا ثابت درنظرگرفتن برخی متغیرها برای پیش‌بینی مدول گسیختگی و الاستیسیتهٔ تختهٔ خرده‌چوب را نشان داده‌اند. دقت این پیش‌بینی‌ها و انطباق آماره‌ها با همدیگر در شکل‌های ۳ و ۴ مشخص است.

جدول ۲. چندین مدل الگوریتم ژنتیک به ترتیب اهمیت برای مدول گسیختگی

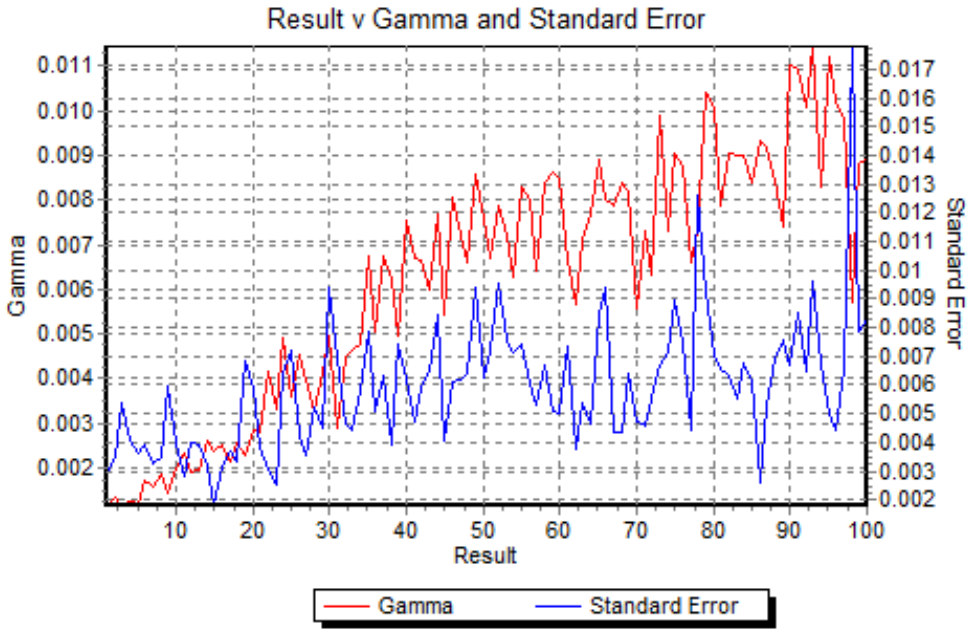
ردیف مدل	متغیرهای ورودی هر مدل (صفر به معنی حذف متغیر و یک به معنی ورود متغیر در مدل است)										آماره	
	A	C	E	F	I	J	K	L	M	گاما	خطای استاندارد
۱	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰/۰۰۱۷	۰/۰۱۱۹
۲	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۵۳
۳	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۴۰
۴	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۸۱
۵	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۳۰
۶	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۸۴

جدول ۳. چندین مدل الگوریتم ژنتیک به ترتیب اهمیت برای مدول الاستیسیته

ردیف مدل	متغیرهای ورودی هر مدل (صفر به معنی حذف متغیر و یک به معنی ورود متغیر در مدل است)											آماره	
	A	C	D	E	F	G	J	K	L	M	گاما	خطای استاندارد
۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۳۰
۲	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۳۵
۳	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۵۴
۴	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۴۱
۵	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۳۶
۶	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۴۰
۷	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۳۳

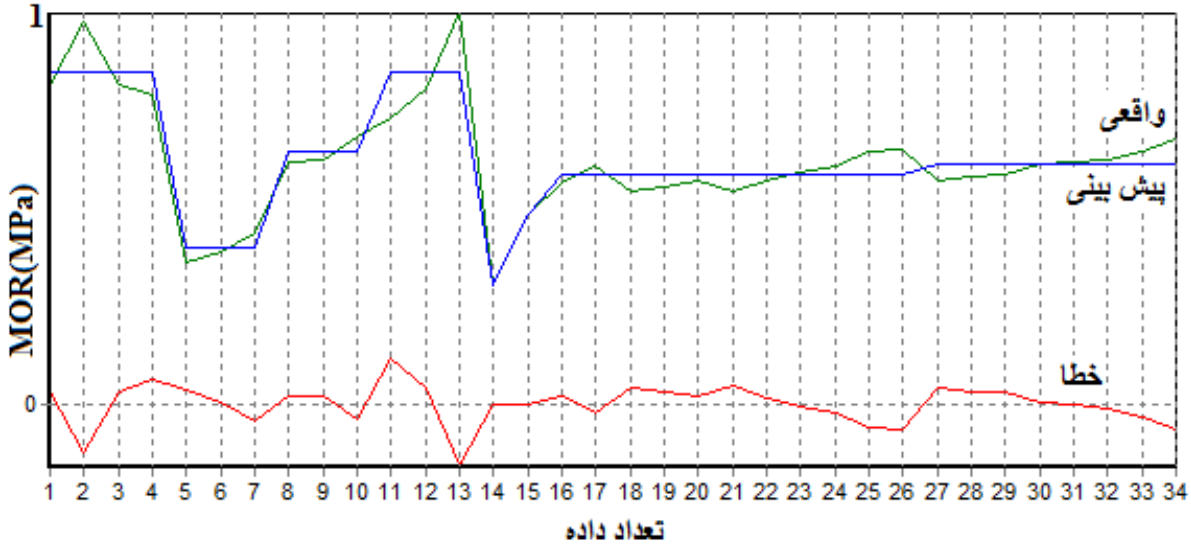


شکل ۳. تعیین دقت داده‌های ورودی با الگوریتم ژنتیک برای مدول گسیختگی

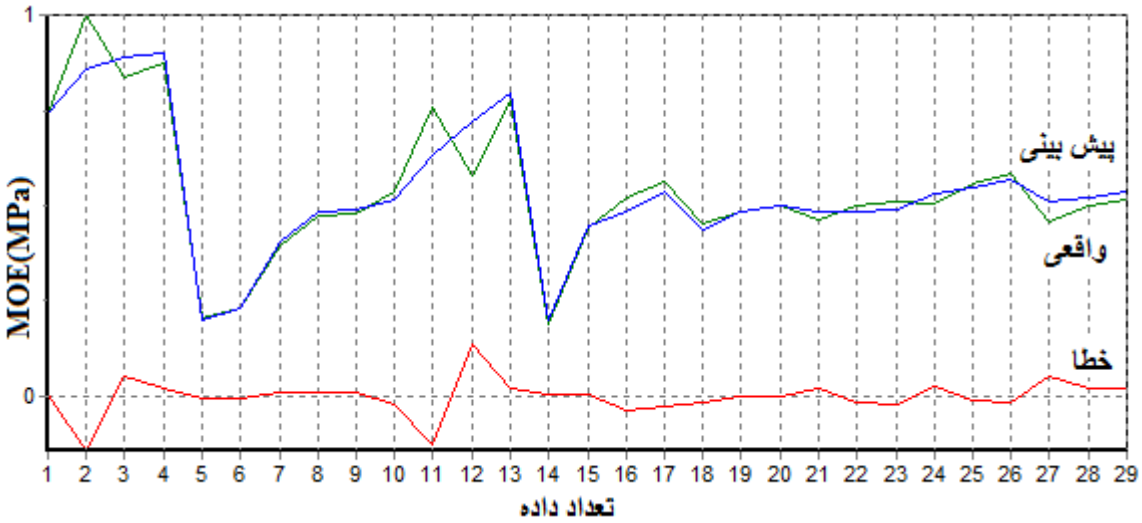


شکل ٤. تعیین دقت داده‌های ورودی با الگوریتم ژنتیک برای مدول الاستیسیته

مدل‌های پیش‌بینی با شبکهٔ عصبی دقت بالایی دارند و دو نمونه از این مدل‌ها شاملِ BFGS (5-5) و BFGS (1-5) در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود. شکل‌های ۵ و ۶ داده‌های واقعی و پیش‌بینی‌شدهٔ یکی از مدل‌های شبکهٔ عصبی مربوط به مدول گسیختگی و الاستیسیته را همراه با مقدار خطای آن‌ها نشان می‌دهند. درصد مطلق خطای این مدل‌های پیش‌بینی برای مدل گسیختگی برابر ۵/۶۴۴ و برای مدول الاستیسیته برابر ۴/۹۱ است. بنابراین، با استفاده از مدل‌های ارائه‌شده و عوامل تعیین‌کننده می‌توان مقدار مدول گسیختگی یا مدول الاستیسیته را کنترل کرد.



شکل ۵. مدل پیش‌بینی با شبکهٔ عصبی BFGS (5-5) با درصد مطلق خطای ٥/٦٤٤ برای مدول گسیختگی



شکل ٦. مدل پیش بینی با شبکهٔ عصبی BFGS (1-5) **با درصد مطلق خطای ٤/٩١ برای مدول الاستیسیته**

متغیرهایی که در مرحلهٔ تجزیه و تحلیل مدل گام‌به‌گام رگرسیون چندمتغیرهٔ خطی مانند رطوبت خرده‌چوب و کیک خرده‌چوب و مقدار درصد کلرید آمونیوم و درصد اختلاط مواد چوبی و منابع لیگنوسلولزی غیرچوبی برای مدول گسیختگی حذف شدند و متغیرهایی که بر اساس آزمون‌های گاما و ام مانند مقدار چسب اورهٔ فرمالدئید اثر کمتری بر روی این خصوصیات داشتند، را می‌توان برای کنترل مدول گسیختگی ثابت در نظر گرفت. از طرف دیگر، متغیرهایی که در مرحلهٔ تجزیه و تحلیل مدل گام‌به‌گام رگرسیون چندمتغیرهٔ خطی مانند رطوبت خرده‌چوب و کیک خرده‌چوب و ضخامت تختهٔ تولیدی برای مدول الاستیسیته حذف شدند و متغیرهایی که بر اساس نتایج آزمون‌های گاما و ام مانند مقدار هاردنر کلرید آمونیوم و دما و فشار پرس برای مدول الاستیسیته اثر کمتری بر روی این خصوصیات داشتند، را می‌توان برای کنترل مدول الاستیسیته ثابت در نظر گرفت.

اما بقیهٔ متغیرها مانند نوع مواد مصرفی، جرم مخصوص خشک مواد اولیه با میانگین‌گیری ساده، جرم مخصوص خشک مواد اولیه با میانگین‌گیری وزنی، جرم مخصوص تختهٔ تولیدی، و زمان پرس، برای هر دو خواص خمشی و ضخامت تختهٔ تولیدی، دمای پرس و فشار پرس برای مدول گسیختگی و همچنین مقدار درصد چسب اورهٔ فرمالدئید، درصد اختلاط مواد چوبی، و منابع لیگنوسلولزی غیرچوبی برای مدول الاستیسیته مهم‌اند. از این رو، این متغیرها در کنترل میزان مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته تعیین‌کننده‌اند. البته نقش عوامل تعیین‌کنندهٔ مؤثری مانند مقدار درصد چسب اورهٔ فرمالدئید و جرم مخصوص تختهٔ تولیدی برای کنترل مقدار مدول الاستیسیته و جرم مخصوص خشک مواد اولیه با میانگین‌گیری ساده، جرم مخصوص خشک مواد اولیه با میانگین‌گیری وزنی، و فشار پرس برای کنترل مقدار مدول گسیختگی بیشتر است. مقدار این خصوصیات را فقط با عوامل تعیین‌کنندهٔ آن می‌توان به کمک مدل‌هایی با روش‌های الگوریتم ژنتیک و شبکهٔ عصبی پیش‌بینی کرد یا تغییر داد. اگر بقیهٔ عوامل غیرمؤثر به مقدار مشخص ثابت نگه داشته شود، با تغییر مقدار این متغیرها می‌توان مقدار خصوصیات مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی را با درصد خطای پایین پیش‌بینی یا کنترل کرد. هماهنگی

بین عوامل تعیین‌کننده در فرایندهای تختهٔ خرده‌چوب باعث تولید محصولی با خصوصیات معین می‌شود. تولید تختهٔ خرده‌چوب با خصوصیات مدول گسیختگی و مدول الاستیسیتهٔ یکنواخت و مناسب با کنترل این عوامل تعیین‌کننده ممکن است. احتمالاً اهمیت کمتر برخی متغیرها در این تحقیق به‌سبب سعی در ثابت نگه‌داشتن مقدار آن‌ها در تحقیقات داخلی است که اطلاعات پایه بر اساس آن‌ها جمع‌آوری شده است. اگر این داده‌ها نوسان‌هایی در سری داده‌ها نداشته باشند، اثر آن‌ها نیز کمتر مشخص خواهد شد و دیگر محققان داخلی نیز مقدار این متغیرها را ثابت در نظر گرفته‌اند یا در مطالعهٔ آن‌ها اهمیتی نداشته است. نتایج این مطالعه متغیرهای مؤثر بر روی خواص خمشی این مطالعات را نشان می‌دهد. خواص خمشی، حساسیت بیشتری به نوسان‌های این مقادیر اندازه‌گیری‌شده دارند؛ مخصوصاً متغیرهایی که وارد مدل‌های بالای جدول الگوریتم ژنتیک شده‌اند. تنظیم خروجی این متغیرها در ثابت نگه‌داشتن خواص خمشی مؤثر است و اگر تحت کنترل نباشند، این خصوصیت نوسان خواهد داشت و کیفیت تختهٔ خرده‌چوب تغییر خواهد کرد.

متغیرها و شرایط ساخت تختهٔ خرده‌چوب در تحقیقات داخلی متنوع است و این شرایط در خصوصیات نهایی تختهٔ خرده‌چوب تأثیرگذارند. شرایط آماده‌سازی و ساخت تختهٔ خرده‌چوب در برخی تحقیقات داخلی به‌صورت ناقص گزارش شده است. متغیرهایی که خصوصیات نهایی را تحت تأثیر قرار می‌دهند و باید در گزارش مقاله ذکر شوند به این شرح‌اند: نام گونه یا گونه‌های مواد اولیهٔ مصرفی، رطوبت خرده‌چوب مصرفی، جرم مخصوص مواد اولیه به‌تفکیک، درصد اختلاط و رطوبت کیک خرده‌چوب و جرم مخصوص وزنی کل انواع گونه‌های خرده‌چوب مصرفی، نوع چسب و هاردنر و مقدار آن‌ها، ضخامت و جرم تختهٔ تولیدی، و زمان و دما و فشار پرس.

رطوبت خرده‌چوب در این تحقیق وارد مدل گام‌به‌گام رگرسیون چندمتغیرهٔ خطی نشده تا در مدل نهایی غیرخطی قرار بگیرد. ولی گرادیان رطوبت با شدت تأثیر مثبت وارد مدل نهایی مدول الاستیسیته می‌شود [۱۷]. اما در اینجا، ثابت درنظرگرفتن مقدار رطوبت خرده‌چوب در تحقیقات داخلی باعث کاهش اثر این عامل بر روی خصوصیات خمشی می‌شود.

این تحقیق نشان داد که جرم مخصوص تختهٔ تولیدی وارد مدل هر دو خصوصیت مکانیکی بررسی‌شده می‌شود و مقدار چسب مصرفی در کنترل مقدار مدول الاستیسیته تأثیرگذار است، ولی برای کنترل مدول گسیختگی می‌توان آن را ثابت در نظر گرفت. اما در تحقیقات دیگر [۱۸]، درصد چسب و دانسیتهٔ تختهٔ خرده‌چوب برای پیش‌بینی هیچ کدام از ویژگی‌های مکانیکی در سطح ۱ درصد معنی‌دار نبوده است.

روش‌های غیرخطی در صنایع چوب و کاغذ به‌صورت محدود [۱۹] ولی روش مدل‌سازی گام‌به‌گام رگرسیون چندمتغیرهٔ خطی در تحقیقات داخلی زیاد استفاده شده است [۲۰، ۲۱]. این روش مقدمهٔ روش‌های غیرخطی مانند الگوریتم ژنتیک و شبکهٔ عصبی است و در این صورت دقت مدل‌های ایجادشده بیشتر می‌شود [۲۵]. به‌طور کلی، روش‌های غیرخطی دقت بیشتری دارند [۲۳]، زیرا تأثیر برخی متغیرها از متغیرهای دیگر بیشتر است و تأثیرشان را در معادله بهتر نشان می‌دهند. روش‌های غیرخطی برای بهینه‌سازی، افزایش کارایی و سرعت تولید تختهٔ خرده‌چوب و دیگر چندسازه‌های چوبی، کاهش هزینه‌ها، و پیش‌بینی خصوصیات کیفی محصول بیشتر استفاده می‌شود [۲۴، ۲۶، ۲۷، ۲۹، ۳۰].

نتیجه‌گیری

داده‌های اطلاعات پایه دربارهٔ برخی پارامترهای مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی تختهٔ خرده‌چوب در تحقیقات داخلی در دسترس بود. عوامل مؤثر تعیین‌کنندهٔ این دو خصوصیت با استفاده از قابلیت روش‌های مدل‌سازی غیرخطی مانند الگوریتم ژنتیک و شبکهٔ عصبی مشخص شدند. عواملی مانند رطوبت خرده‌چوب و کیک خرده‌چوب برای کنترل هر دو خصوصیت و ضخامت تختهٔ خرده‌چوب برای مدول الاستیسیته و همچنین مقدار درصد کلرید آمونیوم و درصد اختلاط مواد چوبی و منابع لیگنوسلولزی غیرچوبی برای مدول گسیختگی را می‌توان ثابت در نظر گرفت. حتی متغیرهایی مانند مقدار هاردنر کلرید آمونیوم و دما و فشار پرس برای مدول الاستیسیته و مقدار چسب اورهٔ فرمالدئید برای مدول گسیختگی را می‌توان به این عوامل کنترل‌کنندهٔ ثابت افزود. متغیرهایی مانند نوع مواد مصرفی، جرم مخصوص خشک مواد اولیه با میانگین‌گیری ساده و وزنی، جرم مخصوص تختهٔ تولیدی، و زمان پرس، برای کنترل هر دو خواص خمشی استفاده می‌شوند. علاوه بر این متغیرها، ضخامت تختهٔ تولیدی و دمای پرس و فشار پرس برای کنترل مدول گسیختگی، و مقدار درصد چسب اورهٔ فرمالدئید و درصد اختلاط مواد چوبی و منابع لیگنوسلولزی غیرچوبی برای کنترل مدول الاستیسیته نیز مهم‌اند. این متغیرهای کنترلی در مقایسه با دیگر متغیرهای بررسی‌شده اثر بیشتری بر خواص خمشی دارند. البته، نقش عوامل تعیین‌کننده‌ای مانند مقدار درصد چسب اورهٔ فرمالدئید و جرم مخصوص تختهٔ تولیدی برای کنترل مقدار مدول الاستیسیته و جرم مخصوص خشک مواد اولیه با میانگین‌گیری ساده و وزنی و فشار پرس برای کنترل مقدار مدول گسیختگی در مقایسه با سایر متغیرهای مؤثر بیشتر است.

References

[1]. Tabarsa, T., Dosthoseini K., and Farsi, M. (2010). Investigation on improving effect of paulownia tomentosa in manufacturing particleboard from eucalyptus cameldolensis. Iranian Journal of Natural Resources, 63(1):23-36.

[2]. Enayati, A.A., Yousefi, H., and Rasouli, D. (2008). Application of Apple pruning on particleboard manufacturing. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 23(1):63-73.

[3]. Enayati, A.A., Reisi, M., and Edalat. H.R. (2009). Investigation of physical and mechanical properties of particleboard made from Apricot pruning and industrial wood particles. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 24(2):244-253.

[4]. Enayati, A.A., and Eslah, F. (2012). Effect of great size wood particles on density profile and physical –mechanical properties of particleboards made from poplar. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 26(4):719-731.

[5]. Kargarfard, A., and Nourbakhsh. A. (2008). Utilization of grape prunings residues in middle layer of particleboard. Pajouhesh & Sazandegi, 78: 186-191.

[6]. Eslah, F. Aenayati, A.A., Faezipour, M., and Tajvidi, M. (2011). Investigation the effect of increasing board density and amount of UF resin on particleboard properties. Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 2(1):103-113.

[7]. Rassam, GH., Rangavar, H., Taghiary, H.R., and Taheri, A. (2011). Study on the possibility of using sunflower stalk in particleboard production. Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 2(2):83-97.

[8]. Rangavar, H., Rasam G., and Aghagolpour V. (2011). Investigation on the possibility of using canola stem residues for particleboard manufacturing. Journal of Wood & Forest Science and Technology, 18(1):91-104.

[9]. Kargarfard, A. (2011). The effect of resin gradient and press time on the physical and mechanical properties of particleboard produced from citrus tree wood. Journal of Wood & Forest Science and Technology, 18(2):25-40.

[10]. Reisi, M., Aenayati, A.A., Doost Hoseini K., and Pourtahmasi K. (2012). Evaluation of layering technique effect with poplar and resin content in surface layer and press time on physical and mechanical properties of particleboard. Journal of Wood & Forest Science and Technology, 19(1):135-148.

[11]. Kargarfard, A., and Nourbakhsh. A. (2004). Utilization of grape prunings residues in particleboard. Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 19(2): 159-173.

[12]. Kargarfard, A., Nourbakhsh, A., and Golbabaei, F. (2006). Investigation on utilization of cotton stalk in particleboard production. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 21(2):95-104.

[13]. Kargarfard, A. (2010). Utilization of corn stalk in particleboard production. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 25(2):147-156.

[14]. Habibi, M.R., Hosseinkhani, H., and Mahdavi, S. (2012). The potential of mesquite (somr) wood in particleboard production. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 27(1):51-68.

[15]. Habibi, M.R., Hosseinkhani, H., Mahdavi, S., and Sepidehdam, J. (2011). Effect of wood species on particleboard properties. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 26(1):58-71.

[16]. Nourbakhsh, A., Kargarfard, A., and Golbabaei, F. (2009). Investigation of physical and mechanical properties of paulownia wood in particleboard Industry. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 24(1):15-25.

[17]. Kargarfard, A., Doosthosseini, K., and Nourbakhsh, A. (2008). The pridiction of particleboard properties with regression models application in different condition production. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 23(1):1-11.

[18]. Arabi, M., Faezipour, M., Layeghi, M., and Aenayati, A.k. (2011). Prediction mechanical properties of particleboard and analysis the interaction effect of slenderness ratio and resin content, using linear, quadratic and exponential equation. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 26(3):511-522.

[19]. Amere, M., Adebe, M.A., and Purmosa, S. (2009). Determine of factors affecting on the quality of printed paper packaging optimization using experimental design. Journal of Forest and Wood Products (Natural Resources of Iran), 62(1): 11-20.

[20]. Moradian, M.H., Ebraheme, G., Resalate, H., and Durado, A. (2008). Evaluation of statistical models for predicting the burst strength and tear paper in Mazandaran Wood and Paper factory. Journal of Iran Natural Resources, 61(1): 733-749.

[21]. Hatam A., Pourtahmasi K., Resalati H., and Lohrasebi A.H. (2008). Modeling hydrogen peroxide bleaching to predict optical properties of bleached hardwood CMP. Wood Science and Technology, 42:353–367.

[22]. Esteban, L.G., Fernandez, F.G., de Palacios, P., and Conde, M. (2009). Artificial neural networks in variable process control: application in particleboard manufacture. Investigacion Agraria: Sistemas y Recursos Forestales, 18(1), 92-100.

[23]. Fernandez, F.G., Esteban, L.G., de Palacios, P., Navarro, N., and Conde, M. (2008). Prediction of standard particleboard mechanical properties utilizing an artificial neural network and subsequent comparison with a multivariate regression model. Investigacion Agraria: Sistemas y Recursos Forestales, 17(2), 178-187.

[24]. Yapici, F., and Ulucan, D. (2012). Prediction of modulus of rupture and modulus of elasticity of heat treated Anatolian chestnut (Castanea Sativa) wood by Fuzzy Logic Classifier. Drvna Industrija, 63 (1) 37-43.

[25]. Andre, N., Cho, H.W., Baek, S.H., Jeong, M.K., and Young, T.M. (2008). Prediction of internal bond strength in a medium density fiberboard process using multivariate statistical methods and variable selection. Wood Science and Technology, DOI 10.1007/s00226-008-0204-7.

[26]. Ozcifci, A., Yapici, F., and Altun, S. (2009). The prediction of effect of grain angle over modulus of rupture and modulus of elasticity values on Scotch pine with Fuzzy logic classifier. 5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09), May 13-15, University of Karabuk, Turkey, pp.1-5.

[27]. Ismail, F.Sh., and Abu Bakar, N. (2012). Predicting fiberboard physical properties using multilayer perceptron neural network. International Journal of Scientific & Engineering Research, (3) 8: 1-4.

[28]. Bayatkashkoli, A. (2013). Evaluation of process variables effect on the bursting strength of newsprint, printing and writing paper. Journal of the Indian Academy of Wood Science, 10(1):55–61.

[29]. Yapici, F., Ozcifci, A., Akbulut, T., and Bayir, R. (2009). Determination of modulus of rupture and modulus of elasticity on flake board with fuzzy logic classifier. Materials & Design, (30)6, 2269–2273.

[30]. Cook, D., and Chiu, C.C. (1997). Predicting the internal bond strength of particleboard, utilizing a radial basis function neural network. Engineering Applications of Artificial Intelligence, (10)2, 171–177.

[31]. Kumar A., and Hand V.C. (2000). Feasibility of using neural networks and genetic algorithms to predict and optimize coated paper and board brightness. Industrial Engineering Chemistry Research, 39: 4956-4962.

[32]. Stefansson, A., Koncar, N., and Jones, A.J. (1997). A note on the Gamma test. Neural Computing & Applications, 5:131-133.

[33]. Ennett, C., Frize, M., and Walker, C. (2001). Influence of missing values on artificial neural network performance. Medinfo, 10: 449-503.