

## مقایسه کارایی انواع مدل‌های رگرسیونی برای پیش‌بینی ثبات ابعاد چوب نراد تیمار حرارتی شده بر اساس شاخص‌های رنگ، زاویه تماس و کاهش جرم

اکبر رستم‌پور هفتخوانی<sup>۱\*</sup>، فرشید عبدلی<sup>۲</sup>، محمدرضا عبده<sup>۲</sup>

۱. استادیار گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، نور، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۹

### چکیده

این تحقیق با هدف پیش‌بینی جذب آب و واکنش‌پذیری ابعاد چوب نراد (*Abies alba*) تیمار حرارتی شده در دماهای ۱۸۰، ۲۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد با رگرسیون خطی ساده، چندگانه و غیرخطی انجام گرفت. اختلاف رنگ کل ( $\Delta E$ )، اختلاف روشنائی ( $\Delta L$ )، زاویه تماس قطره و کاهش جرم، شاخص‌های پیش‌بینی‌کننده انتخاب شدند. نتایج نشان داد که مقادیر جذب آب و واکنش‌پذیری در جهات طولی، مماسی و شعاعی با افزایش دمای تیمار کاهش یافتند؛ اما مقادیر مطلق  $\Delta E$ ،  $\Delta L$ ، زاویه تماس و کاهش جرم با افزایش دمای تیمار افزایش پیدا کردند. کمترین درصد میانگین مطلق خطا (MAPE) برای پیش‌بینی جذب آب با مدل رگرسیون ساده، مدل درجه سه بر اساس کاهش جرم با MAPE حدود ۶/۲۲ بود. کمترین MAPE برای پیش‌بینی واکنش‌پذیری حجمی، مماسی، شعاعی به ترتیب ۳/۰۱، ۳/۵۵ و ۴/۲ و مربوط به رگرسیون ساده درجه سه بر اساس کاهش جرم بودند. مقادیر MAPE برای پیش‌بینی جذب آب، واکنش‌پذیری شعاعی و واکنش‌پذیری حجمی با مدل رگرسیون چندگانه خطی به ترتیب ۶/۱۱، ۳/۹، ۳/۸۹ و ۲/۷ بودند. مقادیر متناظر آنها نیز برای مدل رگرسیون چندگانه غیرخطی به ترتیب ۵/۷۶، ۳/۸۶، ۳/۶ و ۲/۶۱ بود. از آنجا که MAPE کمتر از ۱۰ درصد برای پیش‌بینی رضایت‌بخش است، نتایج نشان داد که مدل‌های بررسی شده با دقت قابل قبولی جذب آب و واکنش‌پذیری ابعاد چوب تیمار حرارتی شده را پیش‌بینی کرده‌اند. بهترین مدل رگرسیونی از نظر زمان و هزینه، مدل ساده و بهترین شاخص پیش‌بینی‌کننده از نظر زمان، هزینه و قابلیت اندازه‌گیری در خط شاخص تغییر رنگ است.

**واژه‌های کلیدی:** پیش‌بینی رگرسیون، تغییر رنگ، تیمار حرارتی، ثبات ابعاد، زاویه تماس، کاهش جرم.

### مقدمه

گرمایی چوب سبب کاهش خاصیت نم‌پذیری، تغییر ابعاد، زاویه تماس، کاهش جرم و همچنین تغییر رنگ چوب می‌شود [۱-۵]. برای کنترل کیفیت چوب‌های تیمار حرارتی شده باید ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آنها با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری و کنترل شوند. جذب آب و تغییر ابعاد ناشی از آن، از مهم‌ترین خواص فیزیکی چوب‌های تیمار حرارتی شده است که اندازه‌گیری

با توجه به کاربردهای گسترده و روزافزون چوب در صنایع و مصارف گوناگون، توجه به معایب و برطرف کردن آنها در کنار مزایای بی‌ظنیر آن ضروری است. مهم‌ترین عیب چوب، خاصیت نم‌پذیری و تغییر ابعاد ناشی از آن است. اصلاح

\* نویسنده مسئول، تلفن، ۰۹۱۲۴۷۹۵۲۳۴

Email: arostampour@uma.ac.ir

تبادل، واکنش‌پذیری ابعاد و جذب رطوبت چوب را براساس فاکتور رنگ با مدل‌های شبکه عصبی پیش‌بینی کردند که از دقت مطلوبی برخوردار بودند [۱۳]. همان‌گونه که ذکر شد، اندازه‌گیری هر کدام از خواص چوب برای پی بردن به تغییرات آن طی تیمار گرمایی بسیار زمان‌بر و نیازمند صرف هزینه‌های زیاد است. از طرف دیگر، با توجه به اینکه هدف اصلی تیمار گرمایی چوب کاهش جذب آب و واکنش‌پذیری ابعاد و همچنین دستیابی به ثبات ابعاد بهتر برای کاربرد در محیط‌های مرطوب و خارج از ساختمان است، اندازه‌گیری و کنترل کیفیت آنها ضروری است. برای حل این مشکلات استفاده از مدل‌های رگرسیونی برای پیش‌بینی خواص چوب‌های تیمار گرمایی شده از جمله جذب آب و واکنش‌پذیری ابعاد پیشنهاد می‌شود. با وجود اجرای پژوهش‌های متعدد در زمینه استفاده از مدل‌های پیش‌بینی و رگرسیونی در جهت پیش‌بینی خواص چوب‌های تیمار گرمایی شده براساس متغیرهای تولید و فرایندی، در زمینه پیش‌بینی خاصیت جذب آب و واکنش‌پذیری ابعاد چوب‌های تیمار گرمایی شده براساس شاخص‌هایی مانند زاویه تماس قطره، کاهش جرم و تغییر رنگ که به آسانی و در زمانی کوتاه قابل اندازه‌گیری هستند، پژوهش‌های اندکی انجام گرفته است. بر این اساس، این پژوهش با هدف پیش‌بینی خاصیت جذب آب و واکنش‌پذیری ابعاد چوب تیمار گرمایی شده نراد براساس فاکتورهای زاویه تماس، کاهش جرم و تغییرات رنگ برای یافتن بهترین شاخص و بهترین مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی آنها از نظر سهولت، زمان و هزینه اندازه‌گیری انجام گرفت.

## مواد و روش‌ها

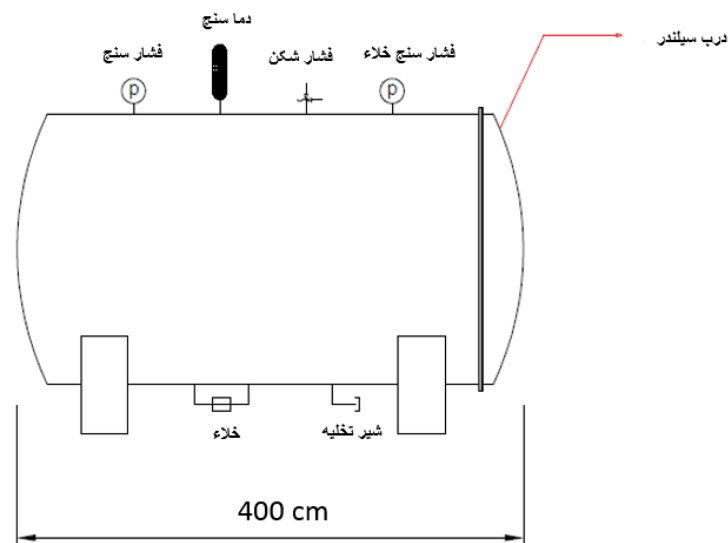
### تیمار گرمایی

تخته‌های مماسی از جنس گونه چوبی نراد (*Abies sp.*) به ابعاد ۳۱۰×۱۲/۵×۲/۵ سانتی‌متر (طول، مماسی و شعاعی) و با دانسیته خشک ۰/۳۸۷ g/cm<sup>3</sup> بعد از خشک شدن تا

آنها زمان‌بر و هزینه‌بر است. از این‌رو، پژوهش‌های متعددی درباره پیش‌بینی ویژگی‌های مختلف چوب‌های تیمار حرارتی شده انجام گرفته است. مقدار R<sup>2</sup> برای پیش‌بینی رطوبت تبادل و دانسیته چوب‌های *Ulundag fir* و *Carpinus betulus L.* تیمار حرارتی شده با شبکه‌های عصبی مصنوعی به ترتیب ۰/۹۹۹ و ۰/۹۹۹ بود که نشان‌دهنده دقت زیاد آنهاست [۶]. میانگین درصد مطلق خطا (MAPE) برای پیش‌بینی هم‌کشیدگی و واکنش‌پذیری ابعاد چوب‌های کاج و راش با شبکه عصبی مصنوعی براساس گونه چوبی و شدت تیمار (دما و زمان) به ترتیب ۲/۶ درصد و ۲/۶۵ درصد گزارش شده است [۷]. همچنین Bekhta (۲۰۲۰) نشان داد که مدل‌های رگرسیونی با دقت زیاد، میزان کاهش مقاومت‌های مکانیکی در تخته‌لایه‌های تیمار حرارتی شده را پیش‌بینی می‌کنند [۸]. مقدار R<sup>2</sup> و MAPE برای پیش‌بینی مقاومت فشاری چوب‌های Scots pine، Oriental spruce، Anatolian Chestnut و Oriental beech براساس دما، زمان و گونه چوبی با شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چندگانه به ترتیب ۰/۹۹۷، ۲/۶۴۱ و ۰/۸۳ و ۷/۶۷۹ گزارش شد که بیانگر دقت زیاد پیش‌بینی مقاومت فشاری چوب توسط این مدل‌هاست [۹]. افزون‌بر این، MAPE و R<sup>2</sup> برای پیش‌بینی مقدار تغییر رنگ کلی با مدل شبکه عصبی براساس گونه چوبی، دما و زمان تیمار به ترتیب ۰/۳۱ و ۰/۹۹ گزارش شده‌اند [۱۰]. مقدار MAPE برای پیش‌بینی مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته چوب تیمار حرارتی شده براساس فاکتورهای دما، زمان و گونه چوبی به ترتیب ۲/۱۴۶ و ۱/۰۴۳ گزارش شده است [۱۱]. همچنین مقدار R<sup>2</sup> برای پیش‌بینی مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته چوب کاج تیمار حرارتی براساس فاکتورهای تغییر رنگ به ترتیب ۰/۹۰۴ و ۰/۷۸۳ گزارش شد [۴]. Tiryaki و همکاران با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چندگانه، مقاومت برشی چسب در چوب‌های تیمار حرارتی شده را با دقت زیادی پیش‌بینی کردند [۱۲]. Nasir و همکاران رطوبت

مدت زمان ماندگاری در دماهای مذکور چهار ساعت بود. بعد از پایان تیمار، نمونه‌ها در داخل سیلندر با قطع سیستم گرمادهی، خنک‌سازی شدند. بعد از خنک‌سازی، از آنها نمونه‌های آزمونی تهیه شد و در دمای  $20 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی  $65 \pm 5$  درصد نگهداری شدند تا به رطوبت تعادل برسند.

رطوبت ۱۲ درصد در داخل سیلندر اصلاح گرمایی ساخت ایران و به ظرفیت ۳ متر مکعب (شکل ۱) قرار گرفتند. سپس خلأ با فشار منفی ۶۰۰ میلی‌متر جیوه درون سیلندر اعمال شد و پس از آن گاز نیتروژن به‌عنوان محیط فراگیر به داخل سیلندر تزریق شد. تیمار گرمایی در دماهای ۱۸۰، ۲۰۰ و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت و



شکل ۱. شماتیک سیلندر تیمار حرارتی

در این رابطه، کاهش جرم (درصد)،  $M_1$  وزن خشک نمونه قبل از تیمار گرمایی (گرم) و  $M_2$  وزن خشک نمونه بعد از تیمار گرمایی (گرم) است.

#### جذب آب و واکنش‌دهی ابعاد

نمونه‌هایی از چوب‌های تیمار شده و تیمار نشده به ابعاد  $2 \times 2 \times 2$  سانتی‌متر (ASTM D-143) تهیه و پس از خشک شدن در آن (دمای  $103 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت)، توزین شدند و ابعاد آنها نیز اندازه‌گیری شد [۱۴]. این نمونه‌ها سپس در آب مقطر به مدت ۲۴ ساعت غوطه‌ور شدند و پس از توزین و تعیین ابعاد، با استفاده از رابطه‌های ۲ تا ۴ مقدار جذب آب و واکنش‌دهی در جهات طولی، شعاعی، مماسی و واکنش‌دهی حجمی آنها محاسبه شد.

#### کاهش جرم

برای محاسبه درصد کاهش جرم، قبل از تیمار حرارتی نمونه‌هایی به ابعاد  $15 \times 5 \times 2$  سانتی‌متر (ضخامت  $\times$  پهنا  $\times$  طول) از تخته‌ها بریده شده و پس از خشک شدن در آن (دمای  $103 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت) توزین شدند و سپس به همراه بار سیلندر اصلاح گرمایی شدند. پس از تیمار، نمونه‌های تیمار شده دوباره برای اندازه‌گیری وزن در آن خشک شدند (دمای  $103 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۴ ساعت). با استفاده از رابطه ۱ کاهش وزن محاسبه شد.

$$ML = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (1)$$

اندازه‌گیری تغییر رنگ نمونه‌هایی به ابعاد  $2 \times 5 \times 15$  سانتی‌متر (ضخامت  $\times$  پهنا  $\times$  طول) قبل و بعد از تیمار حرارتی از تخته‌ها بریده شد و بعد از رنده و سنباده‌کاری شاخص‌های رنگ آنها اندازه‌گیری و سپس شدت تغییر رنگ نمونه‌ها طبق رابطه‌های ۵ تا ۸ محاسبه شد.

$$\Delta L = L_2 - L_1 \quad (5)$$

$$\Delta a = a_2 - a_1 \quad (6)$$

$$\Delta b^* = b_2 - b_1 \quad (7)$$

$$\Delta b^{2/2} \quad (8)$$

#### زاویه تماس

بعد از اندازه‌گیری شاخص‌های رنگ، از نمونه‌های آن برای اندازه‌گیری زاویه تماس قطره آب استفاده شد. اثر تیمار گرمایی بر زاویه تماس دینامیک قطره آب توسط دستگاه زاویه‌سنج مدل PG-X با حجم  $3/5$  میکرولیتر و در مدت ۳۰ ثانیه روی سطح مماسی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

#### مدل‌های رگرسیون

مقادیر جذب آب و واکنشیدگی ابعاد براساس شاخص رنگ، زاویه تماس قطره و کاهش جرم پیش‌بینی شدند. برای مقایسه دقیق‌تر فاکتورها می‌توان از چند شاخص برای پیش‌بینی استفاده کرد. بدین منظور شاخص‌های پیش‌بینی‌کننده ابتدا به صورت تکی در مدل وارد و با مدل رگرسیون ساده بررسی شدند و سپس برای مقایسه دقیق‌تر به صورت همزمان به مدل‌های رگرسیون چندگانه وارد شدند.

#### رگرسیون ساده

در رگرسیون ساده شاخص‌های پیش‌بینی‌کننده به صورت تکی به مدل وارد شدند.

$$Y = a_1 X + b \quad (9) \quad \text{مدل خطی (linear)}$$

$$WA = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (2)$$

که در آن WA جذب آب (درصد)،  $W_1$  وزن نمونه قبل از غوطه‌وری در آب (گرم) و  $W_2$  وزن نمونه بعد از غوطه‌وری در آب (گرم) است.

$$S = \frac{D_2 - D_1}{D_1} \times 100 \quad (3)$$

که در آن S واکنشیدگی (درصد)،  $D_1$  اندازه نمونه قبل از غوطه‌وری در آب (میلی‌متر) و  $D_2$  اندازه نمونه بعد از غوطه‌وری در آب (میلی‌متر) است که با فرمول بالا و با اندازه‌گیری ابعاد در جهات طولی، شعاعی و مماسی قبل و بعد از غوطه‌وری در آب به ترتیب SL، SR و ST محاسبه شدند.

$$SV = \frac{V_2 - V_1}{V_1} \times 100 \quad (4)$$

که در آن SV واکنشیدگی مماسی (درصد)،  $V_1$  حجم نمونه قبل از غوطه‌وری در آب (میلی‌متر مکعب) و  $V_2$  حجم نمونه بعد از غوطه‌وری در آب (میلی‌متر مکعب) است.

#### اندازه‌گیری رنگ

برای اندازه‌گیری تغییر رنگ نمونه‌های چوب در اثر تیمار گرمایی از دستگاه اسپکتروفوتومتر Sheen مجهز به منبع نوری D65 و مشاهده‌کننده استاندارد ۱۰ درجه براساس استاندارد ASTM 2244 در قالب سیستم CIE Lab استفاده شد [۱۵]. فاکتور L روشنی نمونه‌ها را نشان می‌دهد و فاکتورهای a و b هرکدام به ترتیب قرمزی (+a) تا سبزی (-a) و زردی (+b) تا آبی بودن (-b) را نشان می‌دهند. برای مقایسه اختلاف رنگ نمونه‌ها از فاکتور  $\Delta E$  استفاده شد. برای اندازه‌گیری این فاکتور سه نقطه در نواحی چوب بهاره و سه نقطه در نواحی چوب تابستانه به صورت تصادفی در سطح مماسی نمونه‌ها اندازه‌گیری شدند و میانگین آنها برای هر نمونه در نظر گرفته شد. برای

که در آن  $Y$  متغیر وابسته، متغیرهای مستقل  $X_1, X_2, X_3$  و  $X_4$  به ترتیب  $\Delta E, \Delta L$ ، زاویه تماس قطره و کاهش جرم هستند.  $a, b, c, d$  و ضرایب رگرسیون هستند.

#### ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌های رگرسیون

برای بررسی دقت پیش‌بینی مدل‌های رگرسیون از میانگین مطلق درصد خطا (MAPE) و ضریب تشخیص ( $R^2$ ) استفاده شد که فرمول‌های محاسبه آنها به صورت زیر بود:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{|Y_i - Y_p|}{Y_i} \right) 100 \quad (14)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (15)$$

که در آنها  $Y_i$  مقادیر اندازه‌گیری شده،  $Y_p$  مقادیر پیش‌بینی شده،  $\bar{Y}$  میانگین مقادیر پیش‌بینی شده و  $n$  تعداد کل داده‌هاست.

#### تجزیه و تحلیل آماری

برای بررسی تأثیر دمای تیمار بر شاخص تغییر رنگ، کاهش جرم، زاویه تماس قطره، جذب آب، واکنشیدگی حجمی و واکنشیدگی در جهت‌های طولی، مماسی و شعاعی چوب تیمار حرارتی شده از طرح کاملاً تصادفی و آنالیز واریانس یکطرفه استفاده شد. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون چنددامنه‌ای دانکن استفاده شد. در مجموع چهار تیمار (سه تیمار در دماهای مختلف و یک تیمار شاهد) و برای هر تیمار نه تکرار برای هر ویژگی در نظر گرفته شد. تجزیه و تحلیل آماری در سطح اعتماد ۹۵ درصد انجام گرفت.

#### نتایج و بحث

نتایج تغییرات شاخص رنگ ناشی از تیمار حرارتی در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج نشان داد که با افزایش دمای تیمار حرارتی از ۱۸۰ به ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار  $\Delta L$

مدل درجه دو  
(10) Quadratic

$$Y = a_1 X + a_2 X^2 + b$$

مدل درجه سه  
(11) Cubic

$$Y = a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3 + b$$

که در آنها  $Y$  متغیر وابسته (در این پژوهش جذب آب و واکنشیدگی ابعاد است)،  $X$  متغیر مستقل (که در اینجا  $\Delta E, \Delta L$ ، زاویه تماس قطره و کاهش جرم که به صورت منفرد به مدل وارد می‌شوند)،  $b$  ضریب ثابت،  $a$  ضریب رگرسیون و  $e$  ثابت نپراست.

#### رگرسیون چندگانه خطی

برای مقایسه با رگرسیون ساده که در آنها شاخص‌های پیش‌بینی‌کننده به صورت تکی و جداگانه به مدل وارد می‌شدند، از رگرسیون چندگانه خطی استفاده شد که در آن همه شاخص‌های پیش‌بینی‌کننده شامل  $\Delta E, \Delta L$ ، زاویه تماس قطره و کاهش جرم همزمان به مدل وارد شدند تا مقادیر جذب آب و واکنشیدگی ابعاد را پیش‌بینی کنند.

فرمول رگرسیون خطی چندگانه به صورت زیر است:

$$Y = a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + b \quad (12)$$

که در آنها  $Y$  متغیر وابسته، متغیرهای مستقل  $X_1, X_2, X_3$  و  $X_4$  به ترتیب  $\Delta E, \Delta L$ ، زاویه تماس قطره و کاهش جرم هستند.  $b$  ضریب ثابت و  $a$  ضریب رگرسیون است.

#### رگرسیون چندگانه غیرخطی

برای مقایسه با رگرسیون خطی چندگانه، رگرسیون چندگانه غیرخطی بررسی شد که در آن نیز همه شاخص‌های پیش‌بینی‌کننده همزمان به مدل وارد شدند که فرمول آن به شرح زیر بود:

$$Y = a(X_1^b)(X_2^c)(X_3^d)(X_4^e) \quad (13)$$

شعاعی و حجمی به ترتیب ۴۶/۷، ۳۳، ۲۷ و ۳۳/۴ درصد کاهش یافت و با توجه به مقادیر سطح معنی داری، تأثیر دما بر همه آنها از نظر آماری معنی دار است. بر اثر تیمار گرمایی و در پی آن، تخریب ترکیبات چوب مانند همی سلولزها و لیگنین، کاهش جرم در چوب اتفاق می افتد که میزان آن با افزایش شدت تیمار (دما) افزایش می یابد [۱۷]. با تخریب و خروج همی سلولزها، تخریب نواحی بی شکل سلولز و دیگر نواحی آب دوست در چوب، گروه های هیدروکسیل در دسترس چوب در اثر تیمار گرمایی به طور چشمگیری کاهش می یابد که سبب کاهش جذب آب چوب و متعاقباً کاهش واکنشیدگی ابعاد و افزایش ثبات ابعاد در چوب می شود [۱، ۱۸]. با آب گریز شدن چوب در اثر تیمار گرمایی زاویه تماس قطره در این چوب ها افزایش می یابد [۱۹].

$\Delta E$  و  $\Delta L$  به طور چشمگیری تغییر می کند، به طوری که مقادیر مطلق آنها به ترتیب ۹۳/۷ و ۹۰/۱ درصد افزایش یافت که از نظر آماری معنی دار است. تصاویر روند تغییر رنگ در نمونه ها مطابق شکل ۲ است. تیره شدن رنگ چوب در اثر تیمارهای گرمایی را می توان به تشکیل ترکیبات رنگی ناشی از تخریب همی سلولزها و مواد استخراجی و تغییر ساختار شیمیایی لیگنین و تشکیل ترکیبات رنگی ناشی از آنها از جمله کینون ها و ترکیبات فنلی نسبت داد [۱۶]. تأثیر تیمار حرارتی بر زاویه تماس، درصد کاهش جرم، جذب آب و واکنشیدگی ابعاد در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان داد که مقادیر زاویه تماس و درصد کاهش جرم با افزایش دمای تیمار از ۱۸۰ به ۲۲۰ درجه سانتی گراد به ترتیب ۲۱۳/۸ و ۱۶۴/۲ درصد افزایش یافت. از طرف دیگر، با افزایش دمای تیمار، مقادیر جذب آب، واکنشیدگی مماسی،



شکل ۲. تغییرات رنگ چوب های تیمار گرمایی شده (به ترتیب از سمت چپ: شاهد، ۱۸۰، ۲۰۰ و ۲۲۰ درجه سانتی گراد)

و سپس زاویه تماس است، اما اختلاف بین MAPE پیش بینی کننده های مختلف برای پیش بینی جذب آب کم (کمتر از ۲ درصد) است. با توجه به سادگی مدل رگرسیون ساده خطی، مقادیر MAPE و  $R^2$  برای پیش بینی جذب آب در اینجا ارائه می شود. نتایج نشان دادند که مقادیر MAPE برای مدل رگرسیون ساده خطی برای پیش بینی جذب آب براساس  $\Delta E$ ،  $\Delta L$ ،  $\Delta E$  زاویه تماس و افت وزن به ترتیب ۸/۳۲، ۸/۲۹، ۶/۷۶ و ۶/۵۱ بودند. مقادیر  $R^2$  متناظر آنها نیز به ترتیب ۰/۶۷، ۰/۶۸، ۰/۸۱ و ۰/۷۴ بود. مشاهده می شود که بین MAPE مدل های رگرسیون ساده خطی و درجه سه برای پیش بینی جذب آب اختلاف اندکی وجود دارد.

مدل های رگرسیونی برای پیش بینی جذب آب و واکنشیدگی ابعاد

نتایج پیش بینی مدل رگرسیون ساده برای پیش بینی جذب آب و واکنشیدگی ابعاد در جدول های ۳ و ۴ ارائه شده است. نتایج نشان داد که بهترین مدل ساده برای پیش بینی جذب آب، مدل درجه سه است. مقادیر MAPE برای مدل درجه سه به منظور پیش بینی جذب آب چوب تیمار حرارتی شده براساس  $\Delta E$ ،  $\Delta L$ ، زاویه تماس و کاهش جرم به ترتیب ۷/۹۷، ۷/۹۲، ۶/۲۸ و ۶/۲۲ بود. مقادیر  $R^2$  متناظر آنها نیز به ترتیب ۰/۷۱، ۰/۷۱، ۰/۸۴ و ۰/۷۶ بود. نتایج نشان دادند که بهترین پیش بینی کننده از نظر MAPE کاهش جرم

نتایج جدول‌های ۵ و ۶ نشان دادند که مقادیر MAPE برای پیش‌بینی واکشیدگی ابعاد با مدل رگرسیون درجه سه براساس  $\Delta E$ ،  $\Delta E^*$ ، زاویه تماس و کاهش جرم به ترتیب  $3/31$ ،  $3/31$ ،  $3/06$  و  $3$  بود. مقادیر  $R^2$  متناظر آنها نیز به ترتیب  $0/8$ ،  $0/8$ ،  $0/85$  و  $0/84$  بود. مشاهده شد که کاهش جرم و پس از آن زاویه تماس بهترین فاکتورها برای پیش‌بینی واکشیدگی ابعاد بودند، اما اختلاف کمی بین MAPE پیش‌بینی‌کننده برای پیش‌بینی واکشیدگی ابعاد وجود داشت و اختلاف آنها کمتر از  $0/3$  درصد بود. از طرف دیگر مقادیر MAPE برای مدل خطی برای پیش‌بینی واکشیدگی ابعاد براساس  $\Delta E$ ،  $\Delta E$ ، زاویه تماس و کاهش جرم به ترتیب  $3/61$ ،  $3/57$ ،  $3/06$  و  $3/5$  بود. مقادیر  $R^2$  متناظر آنها به ترتیب  $0/78$ ،  $0/79$ ،  $0/85$  و  $0/79$  بود. مشاهده شد که اختلاف کمی بین MAPE مدل خطی و درجه سه وجود دارد.

با توجه به اینکه بهترین مدل برای پیش‌بینی واکشیدگی ابعاد، مدل درجه سه بود و با توجه به سادگی مدل خطی، ضرایب رگرسیون، MAPE و  $R^2$  فقط برای پیش‌بینی واکشیدگی در جهت شعاعی و مماسی فقط برای این دو مدل در جدول ۷ ارائه شد.

نتایج جدول ۷ نشان داد که MAPE مدل درجه سه برای پیش‌بینی واکشیدگی شعاعی براساس  $\Delta L$ ،  $\Delta E$ ، زاویه تماس قطره و کاهش جرم به ترتیب  $3/6$ ،  $3/58$ ،  $3/91$  و  $3/55$  بود.  $R^2$  متناظر آنها نیز به ترتیب  $0/69$ ،  $0/69$ ،  $0/66$  و  $0/7$  بود. همچنین MAPE برای پیش‌بینی واکشیدگی مماسی با مدل درجه سه براساس  $\Delta L$ ،  $\Delta E$ ، زاویه تماس قطره و کاهش جرم به ترتیب  $4/66$ ،  $4/68$ ،  $4/21$  و  $4/2$  بود.  $R^2$  متناظر آنها نیز  $0/71$ ،  $0/71$ ،  $0/79$  و  $0/77$  بود. MAPE شاخص مهمی برای ارزیابی دقت

مدل‌های پیش‌بینی است و مقدار کمتر از ۱۰ درصد برای این شاخص به معنای دقت زیاد مدل‌های پیش‌بینی است [۲۰-۲۲]. براساس نتایج به دست آمده، مدل رگرسیون خطی (جدول‌های ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷) برای پیش‌بینی شاخص‌های جذب آب، واکشیدگی ابعاد و واکشیدگی در جهت‌های شعاعی و مماسی براساس فاکتورهای تغییر رنگ ( $\Delta L$  و  $\Delta E$ )، زاویه تماس و کاهش جرم، مقدار MAPE مطلوبی داشتند. همچنین مقادیر MAPE برای مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه و غیرخطی چندگانه نیز نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل‌های پیش‌بینی هستند (جدول‌های ۸ و ۹). نتایج مربوط به پیش‌بینی جذب آب و واکشیدگی ابعاد براساس  $\Delta L$ ،  $\Delta E$ ، زاویه تماس قطره و کاهش جرم با مدل خطی چندگانه در جدول ۸ ارائه شده است. مقادیر MAPE برای پیش‌بینی جذب آب، واکشیدگی مماسی، واکشیدگی شعاعی و واکشیدگی حجمی به ترتیب  $6/11$ ،  $3/9$ ،  $3/89$  و  $2/7$  بود.  $R^2$  متناظر آنها نیز به ترتیب  $0/84$ ،  $0/81$ ،  $0/7$  و  $0/87$  بود. نتایج مربوط به عامل تورم واریانس نیز در جدول ۸ ارائه شده است. مقادیر VIF بیشتر از ۱۰ نشان‌دهنده وجود هم‌خطی بین متغیرهای مستقل است. نتایج نشان دادند که بین شاخص‌های رنگ ( $\Delta L$  و  $\Delta E$ ) هم‌خطی وجود دارد.

نتایج پیش‌بینی جذب آب، واکشیدگی مماسی، شعاعی و حجمی بر اساس  $\Delta L$ ،  $\Delta E$ ، زاویه تماس قطره و کاهش جرم با رگرسیون غیرخطی در جدول ۹ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که مقادیر MAPE برای پیش‌بینی جذب آب، واکشیدگی مماسی، شعاعی و حجمی به ترتیب  $5/76$ ،  $3/86$ ،  $3/6$  و  $2/61$  بود. مقادیر  $R^2$  متناظر آنها نیز به ترتیب  $0/85$ ،  $0/81$ ،  $0/71$  و  $0/87$  بود.

نتایج جدول‌های ۵ و ۶ نشان دادند که مقادیر MAPE برای پیش‌بینی واکشیدگی ابعاد با مدل رگرسیون درجه سه براساس  $\Delta E$ ،  $\Delta E^*$ ، زاویه تماس و کاهش جرم به ترتیب  $3/31$ ،  $3/31$ ،  $3/06$  و  $3$  بود. مقادیر  $R^2$  متناظر آنها نیز به ترتیب  $0/8$ ،  $0/8$ ،  $0/85$  و  $0/84$  بود. مشاهده شد که کاهش جرم و پس از آن زاویه تماس بهترین فاکتورها برای پیش‌بینی واکشیدگی ابعاد بودند، اما اختلاف کمی بین MAPE پیش‌بینی‌کننده برای پیش‌بینی واکشیدگی ابعاد وجود داشت و اختلاف آنها کمتر از  $0/3$  درصد بود. از طرف دیگر مقادیر MAPE برای مدل خطی برای پیش‌بینی واکشیدگی ابعاد براساس  $\Delta E$ ،  $\Delta E$ ، زاویه تماس و کاهش جرم به ترتیب  $3/61$ ،  $3/57$ ،  $3/06$  و  $3/5$  بود. مقادیر  $R^2$  متناظر آنها به ترتیب  $0/78$ ،  $0/79$ ،  $0/85$  و  $0/79$  بود. مشاهده شد که اختلاف کمی بین MAPE مدل خطی و درجه سه وجود دارد.

با توجه به اینکه بهترین مدل برای پیش‌بینی واکشیدگی ابعاد، مدل درجه سه بود و با توجه به سادگی مدل خطی، ضرایب رگرسیون، MAPE و  $R^2$  فقط برای پیش‌بینی واکشیدگی در جهت شعاعی و مماسی فقط برای این دو مدل در جدول ۷ ارائه شد.

نتایج جدول ۷ نشان داد که MAPE مدل درجه سه برای پیش‌بینی واکشیدگی شعاعی براساس  $\Delta L$ ،  $\Delta E$ ، زاویه تماس قطره و کاهش جرم به ترتیب  $3/6$ ،  $3/58$ ،  $3/91$  و  $3/55$  بود.  $R^2$  متناظر آنها نیز به ترتیب  $0/69$ ،  $0/69$ ،  $0/66$  و  $0/7$  بود. همچنین MAPE برای پیش‌بینی واکشیدگی مماسی با مدل درجه سه براساس  $\Delta L$ ،  $\Delta E$ ، زاویه تماس قطره و کاهش جرم به ترتیب  $4/66$ ،  $4/68$ ،  $4/21$  و  $4/2$  بود.  $R^2$  متناظر آنها نیز  $0/71$ ،  $0/71$ ،  $0/79$  و  $0/77$  بود. MAPE شاخص مهمی برای ارزیابی دقت

جدول ۱. تغییر شاخص‌های رنگ با افزایش دمای تیمار حرارتی

دما (°C)	L	a	b	$\Delta L$	$\Delta a$	$\Delta b$	$\Delta E$
شاهد	۷۸/۷۸ <sup>**D</sup> (۱/۵۵)*	۳/۴۱ <sup>A</sup> (۰/۱۸۶)	۲۴/۹۶ <sup>B</sup> (۱/۲۹)	---	---	---	---
۱۸۰	۵۶/۹۹ <sup>C</sup> (۱/۱)	۷/۸۴ <sup>B</sup> (۰/۱۶۶)	۲۸/۹۹ <sup>C</sup> (۱/۱۳)	-۲۱/۷۹ <sup>C</sup> (۱/۹۶)	۴/۴۳ <sup>A</sup> (۱/۲۶)	۴/۰۴ <sup>C</sup> (۱/۶۳)	۲۲/۶۹ <sup>A</sup> (۱/۸۶)
۲۰۰	۴۹/۲۴ <sup>B</sup> (۰/۱۸۶)	۱۰/۰۴ <sup>C</sup> (۰/۱۶۳)	۲۵/۹۷ <sup>B</sup> (۱/۳۶)	-۲۹/۵۴ <sup>B</sup> (۲/۰۱)	۶/۶۳ <sup>B</sup> (۱/۱۸)	۱/۰۲ <sup>B</sup> (۱/۹۴)	۳۰/۳۶ <sup>B</sup> (۲/۱۷)
۲۲۰	۳۶/۵۷ <sup>A</sup> (۱/۳)	۱۱/۸۸ <sup>D</sup> (۰/۱۷۶)	۲۳/۵۱ <sup>A</sup> (۱/۶۲)	-۴۲/۲۱ <sup>A</sup> (۱/۸)	۸/۴۷ <sup>C</sup> (۱/۲۴)	-۱/۴۴ <sup>A</sup> (۱/۹۸)	۴۳/۱۳ <sup>C</sup> (۱/۹۳)
سطح معنی‌داری	/۰۰۰	/۰۰۰	/۰۰۰	/۰۰۰	/۰۰۰	/۰۰۰	/۰۰۰

\* اعداد داخل پرانتز انحراف معیار را نشان می‌دهد

\*\* اختلاف بین میانگین‌ها با روش دانکن به صورت حروف نمایش داده شده است.

جدول ۲. تغییر زاویه تماس قطره، کاهش جرم، جذب آب و واکنش‌دهی با افزایش دمای تیمار حرارتی

دما (°C)	زاویه تماس	کاهش جرم (%)	جذب آب (%)	واکنش‌دهی طولی (%)	واکنش‌دهی مماسی (%)	واکنش‌دهی شعاعی (%)	واکنش‌دهی حجمی (%)
شاهد	۱۶/۵۸ <sup>**A</sup> (۱/۰۸)*	---	۸۴/۰۶ <sup>D</sup> (۲/۷۸)	۰/۶۲ <sup>C</sup> (۰/۱۳)	۸/۷۱ <sup>D</sup> (۰/۳۳)	۴/۰۴ <sup>D</sup> (۰/۲۷)	۱۳/۳۷ <sup>D</sup> (۰/۴۴)
۱۸۰	۳۴/۱۷ <sup>B</sup> (۱/۰۷)	-۴/۴۸ <sup>C</sup> (۰/۵۷)	۶۴/۸۸ <sup>C</sup> (۳/۵۲)	۰/۳ <sup>(۰/۰۴)</sup>	۷/۳۳ <sup>C</sup> (۰/۳۸)	۳/۵۴ <sup>C</sup> (۰/۲۲)	۱۱/۱۷ <sup>C</sup> (۰/۴۵)
۲۰۰	۴۵/۲۱ <sup>C</sup> (۱/۱)	-۷/۰۲ <sup>B</sup> (۰/۱۶)	۵۱/۷۱ <sup>B</sup> (۳/۳۳)	۰/۱۵ <sup>A</sup> (۰/۰۴)	۶/۵۶ <sup>B</sup> (۰/۳۲)	۳/۲۲ <sup>B</sup> (۰/۱۳)	۹/۹۳ <sup>B</sup> (۰/۳۴)
۲۲۰	۵۲/۰۲ <sup>D</sup> (۲/۷۷)	-۱۱/۸۳ <sup>A</sup> (۱/۴۱)	۴۴/۷۷ <sup>A</sup> (۳/۶۹)	۰/۱۳ <sup>A</sup> (۰/۰۳)	۵/۸۴ <sup>A</sup> (۰/۳۱)	۲/۹۵ <sup>A</sup> (۰/۱۳)	۸/۹۱ <sup>A</sup> (۰/۳۱)
سطح معنی‌داری	/۰۰۰	/۰۰۰	/۰۰۰	/۰۰۰	/۰۰۰	/۰۰۰	/۰۰۰

\* اعداد داخل پرانتز انحراف معیار را نشان می‌دهد

\*\* اختلاف بین میانگین‌ها با روش دانکن به صورت حروف نمایش داده شده است.

جدول ۳. ضرایب رگرسیون ساده، MAPE و R<sup>2</sup> برای پیش‌بینی جذب آب براساس شاخص رنگ ( $\Delta E$  و  $\Delta L$ )

براساس $\Delta E$						
R <sup>2</sup>	MAPE	سطح معنی‌داری	a <sub>3</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	b
۰/۶۷	۸/۳۲	/۰۰۰			-۰/۸۵	۸۱/۱۲
۰/۷	۸/۰۰	/۰۰۰		۰/۰۲۹	-۲/۷۸	۱۱۰/۹۵
۰/۷۱	۷/۹۷	/۰۰۰	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰	-۱/۹۴	۱۰۳/۲
براساس $\Delta L$						
R <sup>2</sup>	MAPE	سطح معنی‌داری	a <sub>3</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	b
۰/۶۸	۸/۲۹	/۰۰۰			-۰/۸۶	۸۰/۵۵
۰/۷	۷/۹۳	/۰۰۰		۰/۰۲۵۸	-۲/۵۳	۱۰۵/۴۹
۰/۷۱	۷/۹۲	/۰۰۰	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰	-۱/۸۳	۹۹/۵۷

جدول ۴. ضرایب رگرسیون ساده، MAPE و R<sup>2</sup> برای پیش‌بینی جذب آب براساس زاویه تماس قطره و کاهش جرم

براساس زاویه تماس						
R <sup>2</sup>	MAPE	سطح معنی‌داری	a <sub>3</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	b
۰/۸۱	۶/۷۶	/۰۰۰			-۱/۰۷	۱۰۰/۶۴
۰/۸۴	۶/۲۸	/۰۰۰		۰/۰۳۰۸	-۳/۷۳	۱۵۶/۴۲
۰/۸۴	۶/۲۸	/۰۰۰	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰	-۲/۴	۱۳۷/۴۷
براساس کاهش جرم						
R <sup>2</sup>	MAPE	سطح معنی‌داری	a <sub>3</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	b
۰/۷۴	۶/۵۱	/۰۰۰			-۲/۴۲	۷۲/۵۹
۰/۷۶	۶/۲۱	/۰۰۰		۰/۱۶۰۶	-۵/۱۸	۸۲/۶۶
۰/۷۶	۶/۲۲	/۰۰۰	-۰/۰۱۸۳	۰/۶۳۱۱	-۸/۸۸	۹۱/۵۲



جدول ۵. ضرایب رگرسیون ساده، MAPE و  $R^2$  برای پیش‌بینی واکشیدگی حجمی براساس شاخص رنگ ( $\Delta E$  و  $\Delta L$ )

براساس $\Delta E$							
$R^2$	MAPE	سطح معنی‌داری	$a_3$	$a_2$	$a_1$	b	مدل
۰/۷۸	۳/۶۰۶	۰/۰۰۰			-۰/۱	۱۳/۲۵۳۳	مدل خطی
۰/۷۹	۳/۳۳۴	۰/۰۰۰		۰/۰۰۱۸	-۰/۲۲	۱۵/۱۲	مدل درجه دو
۰/۸	۳/۳۰۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	-۰/۱۷	۱۴/۶۷	مدل درجه سه
براساس $\Delta L$							
$R^2$	MAPE	سطح معنی‌داری	$a_3$	$a_2$	$a_1$	b	مدل
۰/۷۹	۳/۵۷	۰/۰۰۰			-۰/۱	۱۳/۱۸	مدل خطی
۰/۸	۳/۳۵	۰/۰۰۰		۰/۰۰۱۶	-۰/۲	۱۴/۷۱	مدل درجه دو
۰/۸	۳/۳۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	-۰/۱۶	۱۴/۳۸	مدل درجه سه

جدول ۶. ضرایب رگرسیون ساده، MAPE و  $R^2$  برای پیش‌بینی واکشیدگی حجمی براساس زاویه تماس قطره و کاهش جرم

براساس زاویه تماس							
$R^2$	MAPE	سطح معنی‌داری	$a_3$	$a_2$	$a_1$	b	مدل
۰/۸۵	۳/۰۶	۰/۰۰۰			-۰/۱۲	۱۵/۲۸	مدل خطی
۰/۸۵	۳/۰۶	۰/۰۰۰		۰/۰۰۰۱	-۰/۱۳	۱۵/۴۳	مدل درجه دو
۰/۸۵	۳/۰۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	-۰/۱۳	۱۵/۴۶	مدل درجه سه
براساس کاهش جرم							
$R^2$	MAPE	سطح معنی‌داری	$a_3$	$a_2$	$a_1$	b	مدل
۰/۷۹	۳/۵	۰/۰۰۰			-۰/۲۸	۱۲/۱۵	مدل خطی
۰/۸۳	۳/۰۱	۰/۰۰۰		۰/۰۲۴۵	-۰/۷	۱۳/۶۹	مدل درجه دو
۰/۸۴	۳/۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۱۶	-۰/۵۲	۱۳/۲۶	مدل درجه سه

جدول ۷. ضرایب رگرسیون ساده، MAPE و  $R^2$  برای پیش‌بینی واکشیدگی شعاعی و مماسی براساس  $\Delta E$ ،  $\Delta L$ ، زاویه تماس قطره و

## کاهش جرم

$R^2$	MAPE	سطح معنی‌داری	$a_3$	$a_2$	$a_1$	b	پیش‌بینی کننده	مدل	
۰/۶۸	۳/۷۹	۰/۰۰۰			-۰/۰۳	۴/۱۳	$\Delta E$	مدل خطی	واکشیدگی شعاعی
۰/۶۹	۳/۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۴۸۷	-۰/۰۶	۴/۶۳		مدل درجه سه	
۰/۶۸	۳/۷۶	۰/۰۰۰			-۰/۰۳	۴/۱۱	$\Delta L$	مدل خطی	
۰/۶۹	۳/۵۸	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۴۴۱	-۰/۰۶	۴/۵۳		مدل درجه سه	
۰/۶۴	۴/۱۱	۰/۰۰۰			-۰/۰۳	۴/۵۹	زاویه تماس	مدل خطی	
۰/۶۶	۳/۹۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۰۰۰	-۰/۰۶	۵/۴۲		مدل درجه سه	
۰/۶۲	۴/۵	۰/۰۰۰			-۰/۰۷	۳/۸	افت وزن	مدل خطی	
۰/۷	۳/۵۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱۶۹۴	-۰/۰۳۴۹۵۹	۰/۱۲	۳/۵۲		مدل درجه سه	
۰/۷	۴/۸۷	۰/۰۰۰			-۰/۰۷	۸/۷۱	$\Delta E$	مدل خطی	
۰/۷۱	۴/۶۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۰۱۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰	-۰/۱	۹/۴		مدل درجه سه	
۰/۷	۴/۸۵	۰/۰۰۰			-۰/۰۷	۸/۶۶	$\Delta L$	مدل خطی	
۰/۷۱	۴/۶۸	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۸۸	۰/۰۰۰۰۰۰۰	-۰/۱	۹/۲۲		مدل درجه سه	
۰/۷۸	۴/۰۹	۰/۰۰۰			-۰/۰۸	۱۰/۱	زاویه تماس	مدل خطی	
۰/۷۹	۴/۲۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۱۰۹۴۱	۰/۰۱	۸/۱۱		مدل درجه سه	
۰/۷۵	۴/۳۸	۰/۰۰۰			-۰/۱۹	۸/۰۲	کاهش جرم	مدل خطی	
۰/۷۷	۴/۲	۰/۰۰۰	-۰/۰۰۰۳۴۶۹	۰/۰۲۱۸۰۵۵	-۰/۴۸	۹		مدل درجه سه	

جدول ۸. ضرایب رگرسیون خطی چندگانه، MAPE و  $R^2$  برای پیش‌بینی جذب آب، واکنشیدگی مماسی، شعاعی و حجمی براساس  $\Delta L$ ،  $\Delta E$ ، زاویه تماس قطره و کاهش جرم

$R^2$	MAPE	عامل تورم واریانس ( $VIF$ ) <sup>۱</sup>	سطح معنی‌داری		ضرایب		
۰/۸۴	۶/۱۱	۱۳۶۱/۹۵	۰/۰۰۰۰	۹۴/۵۴	b	ثابت	جذب آب
			۰/۹۶	-۰/۱۷	a <sub>1</sub>	ضریب $\Delta E$	
			۰/۸۸	۰/۵۱	a <sub>2</sub>	ضریب $\Delta L$	
			۰/۰۰	-۰/۹۴	a <sub>3</sub>	ضریب زاویه تماس	
			۰/۰۸	-۱/۲۸	a <sub>4</sub>	ضریب افت وزن	
۰/۸۱	۳/۹	۱۳۶۱/۹۵	۰/۰۰۰۰	۹/۵۳	b	ثابت	واکنشیدگی مماسی
			۰/۶۸	-۰/۱۱	a <sub>1</sub>	ضریب $\Delta E$	
			۰/۶۶	۰/۱۳	a <sub>2</sub>	ضریب $\Delta L$	
			۰/۰۲	-۰/۰۶	a <sub>3</sub>	ضریب زاویه تماس	
			۰/۱	-۰/۱	a <sub>4</sub>	ضریب افت وزن	
۰/۷	۳/۸۹	۱۳۶۱/۹۵	۰/۰۰۰۰	۴/۲۸	b	ثابت	واکنشیدگی شعاعی
			۰/۹۹	۰/۰۰	a <sub>1</sub>	ضریب $\Delta E$	
			۰/۸۹	-۰/۰۲	a <sub>2</sub>	ضریب $\Delta L$	
			۰/۴	-۰/۰۱	a <sub>3</sub>	ضریب زاویه تماس	
			۰/۸۸	-۰/۰۶	a <sub>4</sub>	ضریب افت وزن	
۰/۸۷	۲/۷	۱۳۶۱/۹۵	۰/۰۰۰۰	۱۴/۴۷	b	ثابت	واکنشیدگی حجمی
			۰/۷۵	-۰/۱۱	a <sub>1</sub>	ضریب $\Delta E$	
			۰/۷۶	۰/۱	a <sub>2</sub>	ضریب $\Delta L$	
			۰/۰۶	-۰/۰۸	a <sub>3</sub>	ضریب زاویه تماس	
			۰/۱۷	-۰/۱	a <sub>4</sub>	ضریب افت وزن	

جدول ۹. ضرایب رگرسیون غیرخطی چندگانه، MAPE و  $R^2$  برای پیش‌بینی جذب آب، واکنشیدگی مماسی، شعاعی و حجمی بر اساس  $\Delta E$ ،  $\Delta L$ ، زاویه تماس قطره و کاهش جرم

$R^2$	MAPE	ضرایب رگرسیون					
		e	d	c	b	a	
۰/۸۵	۵/۷۶	-۰/۱۹	-۰/۷۶	۱/۳۴	-۱/۱۶	۷۴۱/۱۷	جذب آب
۰/۸۱	۳/۸۶	-۰/۱۸	-۰/۳	۰/۹۹	-۰/۹	۲۱/۶	واکنشیدگی مماسی
۰/۷۱	۳/۶	-۰/۰۳	-۰/۱۲	۰/۱	-۰/۲۶	۹/۴۸	واکنشیدگی شعاعی
۰/۸۷	۲/۶۱	-۰/۱۲	-۰/۲۹	۰/۶۹	-۰/۶۹	۳۷/۵	واکنشیدگی حجمی

### نتیجه‌گیری

تیمار گرمایی شده استفاده شد. نتایج پیش‌بینی با مدل رگرسیون ساده نشان داد که بهترین مدل رگرسیونی از نظر زمان و هزینه، مدل ساده و بهترین شاخص پیش‌بینی‌کننده از نظر زمان، هزینه و قابلیت اندازه‌گیری در خط، شاخص رنگ است. یکی از روش‌های کم‌هزینه و آسان، پیش‌بینی خواص چوب با شاخص‌هایی است که بتوان به آسانی در کوتاه‌ترین زمان آنها را اندازه‌گیری کرد. از شاخص‌هایی

این پژوهش با هدف تعیین بهترین شاخص پیش‌بینی‌کننده و نیز بهترین مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی جذب آب و واکنشیدگی ابعاد چوب تیمار حرارتی شده انجام گرفت. شاخص‌های پیش‌بینی‌کننده شامل  $\Delta L$ ،  $\Delta E$ ، زاویه تماس قطره و کاهش جرم بودند. از انواع مختلف مدل‌های رگرسیونی ساده، رگرسیون چندگانه خطی و غیرخطی برای پیش‌بینی جذب آب و واکنشیدگی ابعاد چوب‌های

ساعت و همچنین تا زمان اشباع بعد از چند هفته اندازه‌گیری می‌شوند. اما با شاخص‌های بررسی شده در این پژوهش می‌توان در کوتاه‌ترین زمان آنها را پیش‌بینی و در وقت و هزینه اندازه‌گیری آزمایشگاهی آنها صرفه‌جویی کرد.

درصد خطای پیش‌بینی براساس همه شاخص‌های استفاده شده در این پژوهش کمتر از ۱۰ درصد بود که از نظر کاربردی و صنعتی رضایت‌بخش است. اما با توجه به نتایج ارائه شده در این تحقیق، توصیه می‌شود برای پیش‌بینی جذب آب و واکنشیدگی چوب تیمار حرارتی شده با دقت زیاد، زمان و هزینه کم اندازه‌گیری و همچنین سهولت اندازه‌گیری از شاخص‌های تغییر رنگ و زاویه تماس قطره، و همچنین مدل رگرسیونی ساده استفاده شود.

که در این پژوهش انتخاب شدند، فقط شاخص رنگ شرایط مذکور را داشت. پس از آن زاویه تماس قطره روی چوب تیمار حرارتی شده که طی حداکثر ۶۰ ثانیه اندازه‌گیری می‌شود، این ویژگی را دارد. اما کاهش جرم با اندازه‌گیری وزن چوب قبل و بعد از تیمار قابل اندازه‌گیری است. از این رو، شاخص رنگ و زاویه تماس قطره ارجح خواهند بود. از طرف دیگر، نتایج پیش‌بینی جذب آب با رگرسیون خطی چندگانه نشان داد که بین شاخص‌های پیش‌بینی کننده هم خطی وجود دارد. همچنین به دلیل خطای پیش‌بینی کم بین مدل‌های ساده که از یک شاخص پیش‌بینی استفاده می‌کنند و مدل‌های چندگانه که همزمان از چند شاخص استفاده می‌کنند، مدل‌های ساده از نظر هزینه و زمان برتری دارند. جذب آب و واکنشیدگی ابعاد چوب‌های تیمار حرارتی شده به صورت ۲ و ۲۴

## References

- [1]. Tarmian, A., and Mastouri, A. (2018). Water-repellent efficiency of thermally modified wood as affected by its permeability. *Journal of Forestry Research*, 29 (3), 859-867.
- [2]. Fu, Z., Zhou, Y., Gao, X., Liu, H., and Zhou, F. (2019). Changes of water related properties in radiata pine wood due to heat treatment. *Construction and Building Materials*, 227 116692.
- [3]. Sivrikaya, H., Tesařová, D., Jeřábková, E., and Can, A. (2019). Color change and emission of volatile organic compounds from Scots pine exposed to heat and vacuum-heat treatment. *Journal of Building Engineering*, 26 100918.
- [4]. Fu, Z., Zhou, F., Gao, X., Weng, X., and Zhou, Y. (2020). Assessment of mechanical properties based on the changes of chromatic values in heat treatment wood. *Measurement*, 152 107215.
- [5]. Sivrikaya, H., Hosseinpourpia, R., Ahmed, S. A., and Adamopoulos, S. (2020). Vacuum-heat treatment of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood pretreated with propanetriol. *Wood Material Science & Engineering* 1-9.
- [6]. Ozsahin, S., and Murat, M. (2018). Prediction of equilibrium moisture content and specific gravity of heat treated wood by artificial neural networks. *European journal of wood and wood products*, 76 (2), 563-572.
- [7]. Tiryaki, S., Bardak, S., Aydin, A., and Nemli, G. (2016). Analysis of volumetric swelling and shrinkage of heat treated woods: Experimental and artificial neural network modeling approach. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 18 (3), 477-492.
- [8]. Bekhta, P. (2020). Effect of heat treatment on some physical and mechanical properties of birch plywood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 78 (4), 683-691.
- [9]. Tiryaki, S., and Aydin, A. (2014). An artificial neural network model for predicting compression strength of heat treated woods and comparison with a multiple linear regression model. *Construction and Building Materials*, 62 102-108.
- [10]. Van Nguyen, T. H., Nguyen, T. T., Ji, X., and Guo, M. (2018). Predicting color change in wood during heat treatment using an artificial neural network model. *BioResources*, 13 (3), 6250-6264.
- [11]. Tiryaki, S., and Hamzaçebi, C. (2014). Predicting modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) of heat treated woods by artificial neural networks. *Measurement*, 49 266-274.

- [12]. Tiryaki, S., Özşahin, Ş., and Yıldırım, İ. (2014). Comparison of artificial neural network and multiple linear regression models to predict optimum bonding strength of heat treated woods. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 55 29-36.
- [13]. Nasir, V., Nourian, S., Avramidis, S., and Cool. (2019). Prediction of physical and mechanical properties of thermally modified wood based on color change evaluated by means of “group method of data handling”(GMDH) neural network. *Holzforschung*, 73 (4), 381-392.
- [14]. ASTM, A. (2009). D143-09: standard test methods for small clear specimens of timber. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
- [15]. ASTM, D. (2003). 2244. Standard Practice for Calculation of Color Tolerances and Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [16]. Mitsui, K., Takada, H., Sugiyama, M., and Hasegawa, R. (2001). Changes in the properties of light-irradiated wood with heat treatment. Part 1. Effect of treatment conditions on the change in color. *Holzforschung*, 55 (6), 601-605.
- [17]. Zaman, A., Alen, R., and Kotilainen, R. (2000). Heat behavior of *Pinus sylvestris* and *Betula pendula* at 200-230 C. *Wood and Fiber Science*, 32 (2), 138-143.
- [18]. Bekhta, P., and Niemz, P. (2003). Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood.
- [19]. Jennings, J. D., Zink-Sharp, A., Frazier, C. E., and Kamke, F. A. (2006). Properties of compression-densified wood, Part II: surface energy. *Journal of adhesion science and technology*, 20 (4), 335-344.
- [20]. Lewis, C. (1982). *International and Business Forecasting Methods* Butterworths: London.
- [21]. Williams, P. (2001). *Implementation of Near-infrared Technology. Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries*, and Edition.
- [22]. Aydin, G., Karakurt, I., and Hamzacebi, C. (2015). Performance prediction of diamond sawblades using artificial neural network and regression analysis. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40 (7), 2003-2012.

## Performance evaluation of regression models for predicting dimensional stability of heat-treated silver fir wood based on mass loss, contact angle, and color changes

**A., Rostampour Haftkhani\***; Assist., Prof. of Wood Science and Technology, Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili. Ardabil, Iran.

**F., Abdoli**; MSc, Department of Wood and Paper Science, Faculty of Natural Resources, University of Tarbiat Modares, Noor, I.R. Iran.

**M., R., Abdeh**; MSc, Department of Wood and Paper Science, Faculty of Natural Resources, University of Tarbiat Modares, Noor, I.R. Iran.

(Received: 18 April 2021, Accepted: 31 August 2021)

### ABSTRACT

This study aimed to predict water absorption (WA) and swelling of heat-treated silver fir wood (*Abies alba*) at 180, 200, and 220 °C by simple regression, multiple linear regression, as well as multiple non-linear regression models.  $\Delta E$  (total color difference),  $\Delta L$  (lightness difference), contact angle (CA), and mass loss (ML) were used as predictors. The results showed that WA, volumetric swelling (SV), swelling in longitudinal, radial, and tangential directions (SL, SR, and ST) decreased with the increase of heat-treatment temperature, but the values of  $\Delta E$ ,  $\Delta L$ , CA, and ML increased. The lowest mean absolute percentage error (MAPE) for the prediction of WA with the simple regression models was related to the Cubic model based on ML equal to 6.22. The lowest MAPE for the prediction of SV, SR, and ST were related to the Cubic model based on ML equal to 3.01, 3.55, and 4.2, respectively. The MAPE values for the prediction of WA, ST, SR, and SV by the multiple linear regression model were 6.11, 3.9, 3.89, and 2.7, respectively. Their corresponding values for the non-linear regression model were 5.76, 3.86, 3.6, and 2.61, respectively. Since MAPE below 10% is satisfactory for predicting, the studied models have predicted WA and their corresponding swelling of heat-treated wood with acceptable accuracy. The best time and cost-efficient regression model is the simple model, and the best predictor in terms of time, cost, and the ability to measure in line is the color index.

**Keywords:** color index, contact angle, dimensional stability, heat-treatment, mass loss, regression models.

---

\* Correspond Author: Email: arostampour@uma.ac.ir, Tel: +98 9124795234