

شبیه‌سازی زی‌توده تجاری توده‌های آمیخته راش در جنگل‌های هیرکانی

علی اصغر واحدی

دکتری جنگلداری، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

پست الکترونیک: ali.vahedi60@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۲۷

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۷/۱۶

چکیده

تنه تجاری درختان جنگل‌های آمیخته راش علاوه بر حداکثر سهم ارزش نقدی و موجودی حجمی، در قالب زی‌توده تجاری به‌عنوان بزرگ‌ترین ذخایر کربن آلی در جنگل‌های شمال محسوب می‌شوند. هدف اصلی پژوهش پیش‌رو دست‌یابی به حداکثر قطعیت و دقت تخمین مقادیر زی‌توده مورد مطالعه بود. پس از قطع و استحصال ۱۷۴ درخت در جنگل آمیخته راش گلندرود نور، هر بخش از تنه در عرصه وزن شد و قطعات چوبی نیز از هر بخش مذکور با ابعاد ثابت، تکه‌برداری شدند و برای اندازه‌گیری و محاسبه چگالی ویژه در شرایط دمای آون قرار گرفتند. شبیه‌سازی مقادیر زی‌توده مورد مطالعه با استفاده از تکنیک شبکه عصبی مصنوعی انجام شد. برای ارایه دقت روند شبیه‌سازی، الگوسازی آلومتریک با پارامترهای مختلف نیز تبیین شد. از لایه‌های ورودی قطر برابر سینه، ارتفاع تجاری تنه و چگالی ویژه با ترکیب مختلف در الگوسازی آلومتریک و شبیه‌سازی شبکه عصبی استفاده شد. معماری مختلف توپولوژی شبکه الگوریتم پس‌انتشار خطا با تعداد نوروهای متفاوت شامل توابع انتقالی لجستیک سیگموئیدی و تانژانت سیگموئیدی در لایه‌های پنهان، دقت متفاوتی از برآورد متغیر پاسخ ارایه دادند. قطر به‌عنوان مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در شبکه عصبی و معادلات آلومتریک محسوب شد و با افزایش ارتفاع و چگالی ویژه علاوه بر قطر، روند قطعیت برآورد افزایش یافت. نتایج نهایی بر مبنای کلیه شاخص‌های اعتبارسنجی و ریشه میانگین مربعات خطای بین تخمین و مشاهدات نشان داد که اگرچه دقت برآوردی بین الگوسازی آلومتریک و شبیه‌سازی شبکه عصبی دارای اختلاف جزئی بود، اما خروجی بهینه به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی با سه لایه ورودی قطر، ارتفاع و چگالی ویژه، یک لایه پنهان و ۲۰ نرون عصبی حاوی تابع تانژانت سیگموئیدی دارای دقت بیشتری برای پیش‌گویی بود که قابلیت اجرا در سطح وسیعی از جنگل مورد مطالعه را دارد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل رگرسیون، ترسیب کربن، تنه تجاری، هوش مصنوعی.

مقدمه

در رابطه با مقادیر زی‌توده درختان در جنگل داشت. در اغلب مطالعات مربوط به الگوسازی زی‌توده و موجودی کربن درختان در بوم‌سازگان‌های جنگلی، ۵۰ درصد از مقدار زی‌توده برآورد شده به‌عنوان موجودی ذخایر کربن آلی زی‌توده محسوب می‌شود (Zhu et al., 2010). اگرچه در این خصوص، ضریب کربن محاسباتی زی‌توده درختان

تغییرات اقلیم و گرمایش زمین در دهه‌های اخیر منجر به نیاز هر چه بیشتر به اطلاعات مربوط به مقادیر زی‌توده درختان به‌عنوان مهم‌ترین و بزرگ‌ترین ذخایر کربن در جنگل شده است (Djomo et al., 2010). برای ارزیابی و مهار بحران پیش‌رو باید تخمینی درست و نزدیک به واقعیت

گونه‌های مختلف در زیست‌بوم‌ها و شرایط اقلیمی مختلف دارای تفاوت قابل ملاحظه‌ای هستند، اما آنچه مسلم است این است که بین زی‌توده درختان و میزان کربن ترسیب‌شده در آنها همبستگی زیادی وجود دارد. از این رو با برآورد هرچه دقیق‌تر زی‌توده درختان می‌توان به ذخایر کربن آلی آنها دست یافت. با برآورد مقادیر واقعی زی‌توده درختان طی سال‌های مختلف، بوم‌شناسان به این نکته دست یافته‌اند که تاکنون در بوم‌سازگان‌های جنگلی چه مقدار موجودی کربن وجود دارد و حذف و یا حفظ این موجودی چقدر می‌تواند منجر به افزایش یا کاهش میزان انتشار دی‌اکسیدکربن در اتمسفر شود.

با توجه به تبصره ماده ۱۴۸ قانون برنامه پنج‌ساله توسعه جمهوری اسلامی ایران و بند شش این مصوبه مبنی بر عدم بهره‌برداری و خروج چوب‌های صنعتی از جنگل‌های شمال ایران، این ابهام توسط برخی از دستگاه‌های اجرایی وجود دارد که عدم حصول درآمد اقتصادی به‌دست‌آمده از این جنگل‌ها، چگونه باید جبران شود. با توجه به این‌که جنگل‌های آمیخته هیرکانی به‌عنوان مهم‌ترین عرصه اقتصادی و تجاری در ایران محسوب می‌شوند و درآمدهای مالی به‌دست‌آمده از جنگل‌های مذکور وابسته به کیفیت و کمیت تنه درختان صنعتی از جمله راش، بلوط و گونه‌های دیگر موجود است، از این رو پژوهش پیش‌رو به دنبال برآورد و پیش‌بینی مقادیر واقعی زی‌توده تنه درختان در توده‌های آمیخته راش است تا بتوان تحلیل درستی در رابطه با ارزش اکولوژیکی جنگل‌های مذکور داشت. تنه درختان با اختصاص بیشتر از ۵۰ درصد از حجم تجاری و با اختصاص به‌طور تقریب ۸۰ درصد از سهم زی‌توده کل روی زمینی، به‌عنوان اصلی‌ترین منبع ذخیره کربن آلی در بوم‌سازگان‌های جنگلی محسوب می‌شوند (Navar, 2009; Henry et al., 2010; Vahedi & Mataji, 2014).

در زمینه برآورد زی‌توده روی زمینی درختان توده‌های آمیخته جنگل در زیست‌بوم‌های مختلف مطالعات زیادی انجام شده است (Basuki et al., 2009; Djomo et al., 2010; Alvarez et al., 2012; Ekoungoulou et al.,

2014). در کلیه مطالعات مذکور پیش‌بینی زی‌توده و ترسیب کربن توده‌های آمیخته جنگل در قالب معادلات آئومتریک انجام شده است که در آنها متغیرهای زیست‌فیزیکی به‌عنوان عامل‌های توصیفی استفاده شده‌اند. در جنگل‌های طبیعی ایران به‌خصوص برای توده‌های آمیخته رویشگاه‌های مختلف، معادلات پایه وجود ندارد تا بتوان از این معادلات برای تعیین صحت برآورد و بسط پیش‌بینی زی‌توده برای توده‌های مشابه دیگر یا رویشگاه‌های دیگر استفاده کرد. از این رو، در پژوهش پیش‌رو علاوه بر ارایه معادلات آئومتریک، از تکنیک شبکه عصبی مصنوعی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین زیرمجموعه‌های الگوسازی و شبیه‌سازی سیستم هوش مصنوعی استفاده شده است (Hagan et al., 1996).

بدیهی است که در تکنیک مزبور عامل‌های توصیفی (متغیرهای زیست‌فیزیکی) که دارای بیشترین همبستگی با متغیر پاسخ هستند، به‌عنوان مهم‌ترین سیگنال‌های ورودی نورون‌های پردازش‌گر محسوب می‌شوند که در شبکه مورد نظر با تبادل اطلاعات، متغیر پاسخ با بیشترین دقت پیش‌بینی می‌شود (Hagan et al., 1996).

در بین انواع شبکه‌های مورد استفاده در الگوسازی تکنیک شبکه عصبی مصنوعی، شبکه چندلایه پس‌انتشار خطا (Multilayer feed forward back propagation) به‌عنوان پرکاربردترین شبکه عصبی در روند شبیه‌سازی متغیر هدف (به‌خصوص در زمینه بیوفیزیکی) استفاده شده است که در واقع بیشتر شبکه‌های دیگر مورد استفاده، زیرمجموعه شبکه مذکور هستند (Hagan et al., 1996; Haykin, 1998; Naghdi & Ghajar, 2012).

زیادی درخصوص استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و مقایسه آن با تحلیل رگرسیون در جنگل‌های طبیعی انجام شده است که از جمله آنها می‌توان به پژوهش Foody و همکاران (۲۰۰۳) در جنگل‌های آمازون برزیل اشاره کرد که خروجی شبکه عصبی مصنوعی در مقایسه با استفاده از رگرسیون چندگانه برای برآورد زی‌توده، همبستگی زیادی بین داده‌های واقعی و تخمینی را نشان داده است و در نهایت دارای دقت بیشتری برای پیش‌بینی مقادیر زی‌توده بوده

جهت عمومی در کل سری به طور عمده غربی است و بیشینه شیب منطقه در برخی نقاط به ۸۰ درصد نیز می‌رسد. همچنین سنگ مادری در پارسل‌های مورد نظر آهک-مارن است و تیپ خاک نیز قهوه‌ای جنگلی تا راندزین است (Anonymous, 2008). داده‌های آماری ۳۰ ساله ایستگاه هواشناسی نوشهر نشان می‌دهد که میانگین حداکثر و حداقل دما به ترتیب در اواسط مردادماه به میزان ۲۸/۸ درجه سانتی‌گراد و در بهمن‌ماه به میزان ۳/۹ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. متوسط بارندگی سالانه ۱۲۹۳/۵ میلی‌متر است که میانگین حداقل بارندگی در مردادماه و میانگین حداکثر بارندگی در اواخر آبان‌ماه گزارش شده است.

روش پژوهش

برای پژوهش پیش‌رو، ۱۷۴ درخت نشانه‌گذاری شده توسط سازمان‌های اجرایی برای قطع و استحصال انتخاب شدند. با توجه به توزیع قطری در توده‌های نشانه‌گذاری شده، طبقه‌های قطری ۳۰ تا ۶۰، ۶۰ تا ۸۰ و بیشتر از ۸۰ سانتی‌متر از گونه‌های مختلف درختان انتخاب شدند (Mirabdollahi et al., 2011) و با توجه به عملیات میدانی و اطلاعات دریافتی، از هر گونه در هر طبقه قطری مذکور به طور تصادفی حداقل سه و حداکثر هفت پایه قطع شده در نظر گرفته شدند (Henry et al., 2010; Zhu et al., 2010). قبل از قطع درختان، کلیه ویژگی‌های بیوفیزیکی درختان از جمله قطر برابر سینه و ارتفاع تجاری (ارتفاع تنه از محل قطع کننده تا محلی که تاج شروع می‌شود؛ Basuki et al., 2009) اندازه‌گیری شد. به منظور پراکندگی گسترده‌ی عملیات حجم قطع و تبدیل در عملیات میدانی، داده‌های اندازه‌گیری شده در سال ۱۳۹۳ با کلیه داده‌های موجود در آرشیو اسناد دستگاه اجرایی که حاوی داده‌های کمی درختان نشانه‌گذاری شده بودند، تطبیق داده شد.

در عرصه به هنگام تبدیل تنه درختان پس از عملیات تجدید حجم توسط دستگاه‌های اجرایی، از انتهای هر قسمت از گرده‌بینه‌های به دست آمده پس از اندازه‌گیری، از طول تنه به‌ازای دو تا پنج متر (Henry et al., 2010; Zhu et al., 2010) یک دیسک کامل برداشت شد. از دو طرف مخالف

است. Toth و همکاران (۲۰۰۸) از رگرسیون چندگانه و شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی برای پیش‌بینی متغیرهای خاک مانند اسیدیته خاک استفاده کردند که در نهایت، شبکه عصبی مصنوعی کاربردی‌تر معرفی شد. در ادامه می‌توان به تحقیق Bayati و Najafi (۲۰۱۳) در خصوص عملکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در مقایسه با تحلیل رگرسیون برای برآورد حجم تجاری درختان جنگل‌های شمال و پژوهش Tiryaki و Aydin (۲۰۱۴) در رابطه با مقایسه شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون چندگانه در خصوص پیش‌بینی مقاومت فشاری و مکانیکی چوب اشاره کرد که در تمام مطالعات مذکور، شبکه عصبی مصنوعی عملکرد بهتری برای دست‌یابی به حداکثر دقت پاسخ داشته است.

با توجه به مطالب مذکور، هدف اصلی پژوهش پیش‌رو استفاده از تکنیک شبکه عصبی مصنوعی به منظور دست‌یابی به افزایش دقت پیش‌بینی زی‌توده واقعی تنه تجاری درختان نسبت به روش‌های کلاسیک در توده‌های آمیخته راش جنگل‌گندرو است تا مشخص شود آیا سیستم شبیه‌سازی مورد استفاده می‌تواند جایگزین مناسبی برای معادلات آلومتریک محسوب شود یا خیر.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

پژوهش پیش‌رو در سری سه جنگل‌های گندرو نور واقع در حوزه آبخیز ۴۸ جنگل‌های هیرکانی انجام شد که در حوزه استحفاظی اداره کل منابع طبیعی استان مازندران-نوشهر واقع شده است. مساحت کل سری ۱۵۲۱ هکتار است و محدوده آن بین عرض جغرافیایی ۳۰° ۲۷' تا ۳۶° ۱۵' و طول جغرافیایی ۲۵° ۵۳' تا ۵۱° ۲۵' شرقی قرار دارد. ارتفاع از سطح دریا در این سری از ۹۴۰ تا ۱۵۲۰ متر متغیر است. سری مورد مطالعه معروف به سری سرگلند، به‌عنوان جنگل آمیخته راش محسوب می‌شود، به طوری که درختان راش به طور آمیخته با بلندمازو، مرز، پلت، شیردار، نمدار، آزاد و غیره پراکنش دارند.

مدل مذکور برای عدم ناهمگنی پراکنش با احتساب چند متغیر مستقل به‌طور هم‌زمان به‌صورت رگرسیون لگاریتمی خطی چندگانه ($\ln Y = \ln a + b \ln x$) تغییر شکل یافت (Chave *et al.*, 2005; Djomo *et al.*, 2010). در تبدیل مقادیر لگاریتمی به مقدار واقعی با محاسبه ضریب تصحیح $[CF = \exp(\frac{SEE^2}{Y}) \rightarrow CF > 1]$ و با استفاده از مدل $Y = a \times e^{b \times [\ln a + b \times \ln x]} \times CF$ رابطه $Y = a \times e^{b \times [\ln a + b \times \ln x]} \times CF$ (Chave *et al.*, 2005; Djomo *et al.*, 2011) برای رگرسیون خطی چندگانه از آزمون چند هم‌خطی (Multicollinearity) استفاده شد و برای تأیید اعتبار محاسباتی مقدار عددی فاکتور تورم واریانس ($VIF < 10$) به‌عنوان شاخص اصلی مورد سنجش قرار گرفت (Bihanta *et al.*, 2011). در نهایت برای انتخاب مدل بهینه، ضریب تبیین، میانگین مربعات باقی‌مانده‌ها (RMS) و ضریب اطلاعات آکاییک ($AIC \downarrow$) به‌عنوان شاخص‌های اعتبارسنجی استفاده شدند (Basuki *et al.*, 2009; Djomo *et al.*, 2010; Ribeiro *et al.*, 2011). برای محاسبه ضریب اطلاعات آکاییک در صورتی که نسبت مشاهدات کل به تعداد پارامترهای محاسباتی بیشتر از ۴۰ بود ($n/k > 40$)، از رابطه ۱ و در صورتی که نسبت مذکور کمتر از ۴۰ بود، از رابطه ۲ استفاده شد (Burnham & Anderson, 2002):

$$AIC = n \ln\left(\frac{RSS}{n}\right) + 2k \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$AIC = n \ln\left(\frac{RSS}{n}\right) + 2k + \left[2k \left(\frac{k+1}{n-k-1} \right) \right] \quad \text{رابطه (۲)}$$

باقی‌مانده‌ها و k تعداد پارامترهای مدل محاسباتی است.

دیسک، قطعات ثابتی به ابعاد $2 \times 2 \times 2$ سانتی‌متر مکعب تکه‌برداری شد و نمونه‌های مزبور در آون به مدت ۲۴ ساعت در دمای 3 ± 102 درجه سانتی‌گراد خشک شدند (Henry *et al.*, 2010; Zhu *et al.*, 2010; Ribeiro *et al.*, 2011). چگالی ویژه (Specific wood density) هر یک از نمونه‌ها پس از محاسبه نسبت وزن خشک هر نمونه به حجم تر آن محاسبه شد. وزن هر بخش از تنه پس از وزن شدن در عرصه، در نسبت مذکور ضرب شد و زی‌توده (وزن خشک) هر بخش محاسبه شد. مجموع زی‌توده یا وزن خشک بخش‌های مختلف تنه، به‌عنوان زی‌توده تنه درختان مربوطه در نظر گرفته شد.

الگوسازی معادلات آلومتریکی

مشاهدات به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری زی‌توده به‌عنوان متغیر هدف (پاسخ) در نظر گرفته شد و از سه متغیر قطر برابر سینه (D)، ارتفاع تجاری تنه (H) و چگالی ویژه (WD) به‌عنوان متغیرهای توصیفی (مستقل) برای فرآیند الگوسازی زی‌توده تجاری توده‌های آمیخته راش در جنگل مورد مطالعه استفاده شد. در این خصوص از روش حداقل مربعات استفاده شد و متغیرهای مستقل نامبرده به‌طور گام‌به‌گام با ترکیب متفاوت در معادلات وارد شدند. پس از آزمون و ارزیابی کلیه مدل‌های پایه تعریف‌شده (مدل خطی ساده، مدل منحنی کرو، مدل رشد و غیره) با استفاده از کلیه شاخص‌های اعتبارسنجی و نحوه برازش، مدل توانی ($Y = ax^b$) به‌عنوان مدل پایه آلومتریکی در نظر گرفته شد.

که در آن‌ها: n تعداد مشاهدات، RSS مجموع مربعات

شبیه‌سازی شبکه عصبی مصنوعی

در استفاده از تکنیک شبکه عصبی مصنوعی برای ارزیابی مدل‌های بهینه برای پیش‌بینی متغیر هدف (زی‌توده تجاری توده‌های آمیخته راش جنگل گلندرود) از شبکه FFBP

استفاده شد. در اولین گام، کلیه داده‌ها در قالب ماتریس متغیرهای مستقل و متغیر وابسته طبق رابطه ۳ استانداردسازی شدند (Naghdi & Ghajar, 2012; Bayati & Najafi, 2013).

$$X_n = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در رابطه ۳، x_n متغیر نرمال‌شده، x_i هریک از ورودی‌ها و x_{\min} و x_{\max} به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار ماتریس داده‌های ورودی محسوب می‌شوند. طراحی معماری شبکه مذکور از تعداد مختلف نورون و لایه‌های پنهان با انتخاب توابع انتقالی موجود انجام شد. برای طراحی توپولوژی شبکه عصبی، با انتخاب لایه ورودی، تعداد لایه پنهان و نورون‌ها به تناوب دچار تغییر می‌شوند، تا زمانی که به دقت مورد نظر و انتخاب مدل بهینه دست یافت (Tiryaki & Aydin, 2014). نکته قابل ذکر این است که در شبکه‌های از نوع پس‌انتشار خطا، قاعده مشخصی برای انتخاب تعداد لایه‌های

پنهان و همچنین تعداد نورون‌ها در لایه پنهان وجود ندارد. در واقع روش عمومی برای به‌دست آوردن آنها روش سعی و خطا و البته تجربیات پژوهشگران دیگر است. هرچه همبستگی بین متغیرهای ورودی با خروجی بیشتر باشد، سیگنال‌های دریافتی قوی‌تر است و دست‌یابی به پاسخ با حداکثر دقت است. رایج‌ترین توابع انتقالی مورد استفاده در هریک از توپولوژی‌های طراحی‌شده شبکه FFBP عبارتند از تابع لجستیک سیگموئید (Log-sigmoid) و تابع تانژانت سیگموئید (Tan-sigmoid) که معادلات آنها به ترتیب در رابطه‌های ۴ و ۵ آمده است.

$$Y_i = \frac{1}{1 + \exp(-x_i)} \quad \text{رابطه (۴)} \quad \text{(Log - sigmoid)}$$

$$Y_i = \frac{2}{[1 + \exp(-2x_i)] - 1} \quad \text{رابطه (۵)} \quad \text{(Tan - sigmoid)}$$

(Naghdi & Ghajar, 2012). در این رابطه اگر چنانچه بین آموزش، اعتبار و آزمون در تعداد دور رفت و برگشت پس‌انتشار برای کاهش خطا، همسانی وجود داشته باشد و میزان میانگین مربعات خطای آزمون داده‌ها از همه موارد کمتر باشد، خروجی تعریف‌شده با توپولوژی طراحی‌شده در شبکه از اعتبار بیشتری برخوردار است. برای اعتبارسنجی به‌منظور انتخاب مدل بهینه، از شاخص‌های ضریب تبیین و میانگین مربعات خطای (MSE) آزمون داده‌های مربوط به

در شبیه‌سازی شبکه عصبی با استفاده از توابع فوق، به‌طور معمول خطاهای محاسبه‌شده به لایه‌های پیشین در طی چند دور رفت و برگشت پس‌انتشار (Epoch) می‌یابد تا وزن‌ها و اریبی‌ها اصلاح شوند. در الگوریتم آموزش و ارزیابی شبکه، کل داده‌ها به سه بخش آموزش (Training)، اعتبارسنجی (Validation) و آزمون (Test) تقسیم‌بندی می‌شوند که معیار ارزیابی مدل بهینه بر مبنای برازش و حداقل میانگین مربعات خطای آزمون داده‌ها است

مشاهدات و تخمین هر یک از مدل‌های آومتریکی ($RMSE$) طبق رابطه ۶ و خروجی‌های شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. کلیه تجزیه و تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای MATLAB و SPSS انجام شد.

هریک از خروجی‌های ارائه شده استفاده شد. در نهایت برای ارزیابی و مقایسه دقت برآوردی مدل‌های به دست آمده از شبکه عصبی مصنوعی و تحلیل رگرسیون مرتبط با معادلات آومتریکی، از شاخص خطای جذر میانگین مربعات بین

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2} \Rightarrow 0 \leq RMSE \quad \text{رابطه (۶)}$$

(جدول ۱). طبق نتایج به دست آمده، عامل قطر برابر سینه در مدل یک، به تنهایی ۸۴ درصد از تغییرات واریانس را شامل شد، در صورتی که عامل ارتفاع در مدل دو، با حداقل دقت برآوردی، به تنهایی نتوانست به عنوان متغیر پاسخگو برای پیش‌بینی زی‌توده تجاری توده آمیخته راش در جنگل گلندروود نور محسوب شود (جدول ۱). مطابق جدول ۱ عامل ترکیبی حاصل ضرب مربع قطر برابر سینه، ارتفاع و چگالی ویژه باعث افزایش دقت برآورد شد ($R^2 = 0.94$, $RMS = 0.05$, $AIC = -513/3$).

در رابطه فوق: \hat{Y}_i و Y_i به ترتیب مقادیر تخمینی و مشاهدات واقعی مقادیر زی‌توده تنه درختان بر حسب کیلوگرم است.

نتایج

جدول ۱ کلیه معادلات به دست آمده از الگوسازی معادلات آومتریکی برای برآورد زی‌توده توده‌های آمیخته راش منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کلیه شاخص‌های اعتبارسنجی برای هر یک از مدل‌های مختلف مقادیر عددی متفاوتی را نشان دادند

جدول ۱- نتایج تحلیلی معادلات آومتریکی برای برآورد زی‌توده تجاری جنگل آمیخته راش گلندروود

کد	معادله آومتریکی	b_0	b_1	b_2	b_3	R^2	$Adj.R^2$	RMS	CF	AIC
۱	$\ln Y = b_0 + b_1 \ln(D)$	-۲/۹۷	۲/۵	-	-	۰/۸۴۲	۰/۸۴۱	۰/۱۳۷	۱/۰۷	-۳۴۳/۸۴
۲	$\ln Y = b_0 + b_1 \ln(H)$	۱/۲۷	۲/۲۵	-	-	۰/۴۶۸	۰/۴۶۵	۰/۴۵۸	۰/۶۷۷	-۱۳۳/۵۶
۳	$\ln Y = b_0 + b_1 \ln(D^2 \times H)$	-۳/۸۳	۱/۰۲	-	-	۰/۸۹۶	۰/۸۹۶	۰/۰۹	۱/۰۴	-۴۱۸/۰۶
۴	$\ln Y = b_0 + b_1 \ln(D) + b_2 \ln(H)$	-۳/۸۲	۲/۱۱	۰/۹۱	-	۰/۸۹۷	۰/۹۸۶	۰/۰۸۹	۱/۰۴	-۴۰۷/۳۴
۵	$\ln Y = b_0 + b_1 \ln(D^2 \times H \times WD)$	-۳/۳۱	۱/۰۲	-	-	۰/۹۴۴	۰/۹۴	۰/۰۵۲	۱/۰۲	-۵۱۳/۳۱
۶	$\ln Y = b_0 + b_1 \ln(D) + b_2 \ln(H) + b_3 \ln(WD)$	-۳/۲۱	۲/۰۹	۰/۹۱۷	۱/۱	۰/۹۴۳	۰/۹۴	۰/۰۵۱	۱/۰۲	-۵۱۶/۲۲
۷	$\ln Y = b_0 + b_1 \ln(D) + b_2 \ln(WD)$	-۲/۳۵	۲/۵	۱/۱۲	-	۰/۸۸۵	۰/۸۸۴	۰/۱۱	۱/۰۵	-۴۰۰/۳۷
۸	$\ln Y = b_0 + b_1 \ln(D^2 \times WD)$	-۲/۲۱	۱/۲۴	-	-	۰/۸۸۴	۰/۸۸۴	۱/۰۹	۱/۰۵	-۴۰۰/۵۸
۹	$\ln Y = b_0 + b_1 \ln(D^2 \times H) + b_2 \ln(WD)$	-۳/۲۱	۱/۰۱	۱/۱۱	-	۰/۹۴۴	۰/۹۴	۰/۰۵۱	۱/۰۲	-۵۱۶/۱۸

b_0 , b_1 , b_2 و b_3 : ضریب‌های پارامتری مدل، D : قطر برابر سینه بر حسب سانتی‌متر، H : ارتفاع تنه بر حسب متر، WD : چگالی ویژه بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب، Y : زی‌توده بر حسب کیلوگرم، $Adj.R^2$: ضریب تبیین تعدیل شده، RMS : میانگین مربعات باقی مانده‌ها، CF : فاکتور تصحیح، AIC : ضریب اطلاعات آکاییک

شبیه‌سازی مقادیر زی‌توده جنگل مورد مطالعه نشان داد که احتساب لایه ورودی حاصل ضرب مربع قطر، ارتفاع و چگالی ویژه در شبکه مورد استفاده با توپولوژی دو لایه مخفی شامل تابع انتقال Log-sigmoid و Tan-sigmoid با ترتیب مختلف در مدل‌های هشت و نه، دارای حداقل میانگین مربعات خطای داده‌های آزمایش (۰/۰۰۲) و ضریب تبیین به‌طور تقریب ۰/۹ دارای دقت قابل ملاحظه‌ای برای پیش‌بینی زی‌توده تجاری جنگل آمیخته راش گلندرود نور بودند (جدول ۲). با توجه به جدول ۲ مشخص شد که در توپولوژی‌های مختلف با انتخاب تابع Tan-sigmoid در لایه خروجی، مدل‌های به‌دست‌آمده از تکنیک شبیه‌سازی شبکه عصبی برای رسیدن به خروجی بهینه، دقت برآوردی قابل قبولی را نشان دادند.

با توسعه الگوسازی، نتایج نشان داد که مدل‌های شش و نه با حداقل مقادیر میانگین مربعات باقی‌مانده‌ها، حداقل ضریب تصحیح و حداقل ضریب اطلاعات آکاییک، به‌عنوان مدل‌های بهینه با حداکثر دقت برآورد زی‌توده تجاری جنگل آمیخته راش گلندرود بودند (جدول ۱). در رابطه با مدل‌هایی که دارای چند عامل مستقل و پارامترهای مختلف بودند، نتایج آزمون هم‌خطی با توجه به حداکثر مقادیر فاکتور تورم واریانس به‌دست‌آمده در پژوهش پیش‌رو مقدار عددی ($VIF = 1/38$) کمتر از ۱۰ را نشان داد.

جدول ۲ نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی شبکه عصبی مصنوعی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای هر لایه ورودی، توپولوژی‌های مختلف از توابع انتقال با تعداد نوروں‌های متفاوت دیده شد. نتایج به‌دست‌آمده از

جدول ۲- نتایج تحلیلی شبیه‌سازی شبکه عصبی مصنوعی در رابطه با پیش‌بینی زی‌توده تجاری جنگل آمیخته راش گلندرود

مدل	لایه ورودی	توپولوژی شبکه	تعداد نوروں	Epoch	R^2	MSE
۱	D	Tansig – Logsig	۲ – ۱	۶	۰/۷۷۸	۰/۰۹۹
۲	D	Logsig – Tansig	۵ – ۱	۲۴	۰/۷۷۱	۰/۰۱۲
۳	D	Logsig – Tansig – Tansig	۵ – ۵ – ۱	۱۲	۰/۷۱۷	۰/۰۱۲
۴	$D^2 \times H$	Logsig – Logsig – Tansig	۵ – ۱۰ – ۱	۱۳	۰/۷۹۷	۰/۰۰۷
۵	D - H	Logsig – Tansig	۵ – ۱	۹	۰/۷۶۶	۰/۰۰۷
۶	$D^2 \times H \times WD$	Logsig – Tansig	۱۰ – ۱	۱۴	۰/۸۲۸	۰/۰۰۳
۷	$D^2 \times H \times WD$	Logsig – Logsig – Tansig	۲۰ – ۱۰ – ۱	۹	۰/۸۵۶	۰/۰۰۳
۸	$D^2 \times H \times WD$	Tansig – Tansig – Tansig	۲۰ – ۱۰ – ۱	۱۱	۰/۸۸۸	۰/۰۰۲
۹	$D^2 \times H \times WD$	Logsig – Tansig – Tansig	۲۰ – ۱۰ – ۱	۱۸	۰/۸۹۷	۰/۰۰۲
۱۰	D - H - WD	Tansig – Tansig	۲۰ – ۱	۱۱	۰/۸۵۶	۰/۰۰۲
۱۱	D - H - WD	Logsig – Logsig – Tansig	۳ – ۱۰ – ۱	۲۰	۰/۹۱	۰/۰۰۴

معادلات آومتریک در جدول ۱، مدل‌های نه، شش و پنج به‌ترتیب دارای حداکثر دقت برآورد متغیر هدف بودند.

جدول ۳ مقادیر ریشه میانگین مربعات خطای بین مقادیر تخمینی معادلات آومتریک زی‌توده جنگل و مقادیر واقعی را نشان می‌دهد. مطابق با شاخص‌های اعتبارسنجی

جدول ۳- دقت برآورد مقادیر زی‌توده (کیلوگرم) به‌دست‌آمده از الگوسازی معادلات آلمتریک

معادلات آلمتریک									
معادله ۱	معادله ۲	معادله ۳	معادله ۴	معادله ۵	معادله ۶	معادله ۷	معادله ۸	معادله ۹	
۹۶۰/۹۶	۱۵۳۱/۵۸	۷۷۴/۲۳	۷۸۶/۸۵	۵۳۷/۴۸	۵۳۷/۳۸	۷۸۱/۳۱	۷۷۶/۹۶	۵۳۵/۰۷	RMSE

آن ریشه میانگین مربعات خطای مدل‌های ۱۰، نه، شش و هشت به ترتیب دارای حداقل مقدار عددی بودند.

جدول ۴ مقادیر ریشه میانگین مربعات خطای بین مقادیر تخمینی به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی مقادیر زی‌توده جنگل و مقادیر واقعی را بر حسب کیلوگرم نشان می‌دهد که براساس

جدول ۴- دقت برآورد مقادیر زی‌توده (کیلوگرم) به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی شبکه عصبی مصنوعی

مدل‌های شبکه عصبی											
مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳	مدل ۴	مدل ۵	مدل ۶	مدل ۷	مدل ۸	مدل ۹	مدل ۱۰	مدل ۱۱	
۹۶۲/۰۸	۹۵۹/۵۸	۹۶۶/۹۲	۷۶۶/۷۵	۹۵۴/۲۸	۵۴۷/۳۸	۵۷۱/۵۱	۵۵۶/۶۶	۵۴۶/۴۱	۵۱۵/۲۵	۵۹۲/۳۷	RMSE

بحث

نتایج پژوهش پیش‌رو نشان داد که الگوسازی معادلات آلمتریک و خروجی‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی تکنیک شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی زی‌توده تجاری جنگل مورد مطالعه، دقت خوبی داشتند. نتایج نشان داد که دامنه قطعیت برآورد زی‌توده تجاری جنگل آمیخته راش توسط شبکه عصبی مصنوعی و معادلات آلمتریک به‌طور تقریب شبیه یکدیگر بود. با توسعه الگوسازی انجام‌شده در قالب معادلات آلمتریک و خروجی‌های به‌دست‌آمده از شبکه عصبی مصنوعی، نتایج حاکی از آن بود که خروجی بهینه به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی دارای دقت محاسباتی بیشتر نسبت به معادلات آلمتریک بود. با توجه به این‌که تحلیل رگرسیونی و بررسی شاخص‌های گزینشی در شبیه‌سازی شبکه عصبی مصنوعی با هم تفاوت اساسی دارند (Haykin, 1998; Vahedi et al., 2014)، بنابراین برای بررسی دقت برآورد مدل‌های مختلف معادلات آلمتریک، از شاخص‌های ضریب اطلاعات آکاییک، میانگین مربعات باقی‌مانده‌ها، ضریب تبیین و ضریب تصحیح به‌ترتیب اهمیت استفاده شد (Chave et al., 2005; Basuki et al., 2009; Djomo et al., 2011; Ribeiro et al., 2010; al., 2010). با توجه به پژوهش‌های Hagan و همکاران (۱۹۹۶)، Abedini و Poladi (۲۰۰۳)، Vahedi و همکاران (۲۰۱۴) و Tiryaki و Aydin (۲۰۱۴) برای گزینش خروجی بهینه به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی سیستم هوش مصنوعی، از میانگین مربعات خطای مربوط به آزمون داده‌ها و ضریب تبیین، به‌ترتیب اهمیت استفاده شد. با توجه به ریشه میانگین مربعات خطای مشاهدات (مقادیر واقعی) و مقادیر تخمینی کلیه مدل‌های ارائه‌شده در پژوهش پیش‌رو، نتایج نهایی نشان داد که مدل‌های آلمتریک دارای دقت برآوردی بیشتری از برخی خروجی‌های شبکه عصبی مصنوعی بودند، اما با عملیات سعی و خطا در طراحی توپولوژی‌های مختلف در شبکه مورد استفاده، در نهایت مشخص شد که خروجی بهینه شبکه عصبی برای پیش‌بینی مقادیر وزنی زی‌توده تجاری جنگل مورد مطالعه، قطعیت بیشتری دارد. مطالعات مربوط به مقایسه شبیه‌سازی شبکه عصبی مصنوعی و تحلیل رگرسیونی به این نتیجه رسیده‌اند که شبکه‌های عصبی دارای دقت برآورد بیشتری از متغیرهای هدف در زمینه بیولوژی هستند (Foody et al., 2003; Bayati & Najafi, 2013;)

نتایج پژوهش پیش‌رو نشان داد که الگوسازی معادلات آلمتریک و خروجی‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی تکنیک شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی زی‌توده تجاری جنگل مورد مطالعه، دقت خوبی داشتند. نتایج نشان داد که دامنه قطعیت برآورد زی‌توده تجاری جنگل آمیخته راش توسط شبکه عصبی مصنوعی و معادلات آلمتریک به‌طور تقریب شبیه یکدیگر بود. با توسعه الگوسازی انجام‌شده در قالب معادلات آلمتریک و خروجی‌های به‌دست‌آمده از شبکه عصبی مصنوعی، نتایج حاکی از آن بود که خروجی بهینه به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی دارای دقت محاسباتی بیشتر نسبت به معادلات آلمتریک بود. با توجه به این‌که تحلیل رگرسیونی و بررسی شاخص‌های گزینشی در شبیه‌سازی شبکه عصبی مصنوعی با هم تفاوت اساسی دارند (Haykin, 1998; Vahedi et al., 2014)، بنابراین برای بررسی دقت برآورد مدل‌های مختلف معادلات آلمتریک، از شاخص‌های ضریب اطلاعات آکاییک، میانگین مربعات باقی‌مانده‌ها، ضریب تبیین و ضریب تصحیح به‌ترتیب اهمیت استفاده شد (Chave et al., 2005; Basuki et al., 2009; Djomo et al., 2011; Ribeiro et al., 2010; al., 2010).

(Tiryaki & Aydin, 2014).

بودند، اما لزوماً ارتباط بین آنها با مقادیر زی توده خطی نبود. از این رو اگر متغیرهای مذکور به طور مستقیم در روابط خطی چندگانه به صورت $Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n$ برای برآورد زی توده معرفی شوند، دارای خطای زیاد و برآورد غیرقابل قبول هستند. در روند پژوهش پیش رو از روابط مذکور برای برآورد زی توده استفاده شد، اما به دلیل عدم دستیابی به دقت قابل ملاحظه، از ارایه تحلیلی آن خودداری شد. یکی از مهم ترین مزایای استفاده از تکنیک شبکه عصبی مصنوعی برای پیش بینی متغیرهای پاسخ که اندازه گیری آنها بسیار مشکل، زمان بر و پرهزینه است، در نظر گرفتن کلیه روابط غیرخطی در بوم سازگان های طبیعی است. در واقع علت استفاده از شبکه عصبی در پژوهش پیش رو این است که سیستم مورد استفاده، Function approximator است؛ یعنی حداقل نظم بین داده های ورودی و خروجی در این سیستم در نظر گرفته شده است که در دقت پیش گویی تأثیر به سزایی دارد. از این رو چون شبکه عصبی، همبستگی بین متغیرهای توصیفی با یکدیگر و متغیر خروجی، نوع روابط بین آنها و همچنین وضعیت تقارن توزیع داده ها را در بر گرفته است و موانع مذکور را طی هر الگوریتم آموزش، پس از تثبیت وزن دهی اولیه داده ها، بر طرف می کند و علاوه بر آن برخلاف تحلیل های رگرسیون دارای محدودیت های مدل سازی نیست، از این رو تکنیک مذکور یک جایگزین مناسب و درخور توجه برای رقابت با معادلات آلمتریک برای پیش بینی بهینه مقادیر زی توده درختان محسوب می شود.

در پژوهش پیش رو مدل آلمتریک بازنمایی $Y = [Exp((lnY = b_0 + b_1 \ln(D^2 \times H) + b_2 \ln(WD)))] \times CF$ به عنوان مدل بهینه نهایی محسوب شد که در مقایسه با مدل های آلمتریک دیگر بر مبنای مقدار $RMSE$ دارای حداقل خطای برآوردی بود. در رابطه با شبیه سازی به دست آمده از شبکه عصبی مصنوعی با ورود سه لایه ورودی قطر، ارتفاع و چگالی ویژه با یک لایه پنهان، خروجی به دست آمده دارای بیشترین دقت پیش بینی زی توده جنگل آمیخته راش در منطقه مورد مطالعه محسوب شد. با

بر اساس تحلیل رگرسیون خطی چندگانه، اغلب روابط بین عامل های توصیفی و وابسته به طور خطی بیان می شود، در حالی که بین بیشتر مؤلفه های بیولوژیکی با توجه به پیچیدگی ارتباط بین آنها، روابط غیرخطی وجود دارد. بدیهی است که مدل های توانی یکی از مهم ترین و کاربردی ترین مدل های غیرخطی رایج در زمینه بیولوژی با حداقل خطای برآورد نسبت به مدل های پایه دیگر هستند (Ketterings *et al.*, 2001) که به طور معمول به عنوان مدل پایه برآورد زی توده درختان جنگل محسوب می شوند (Zianis & Mencuccini, 2004). به همین دلیل کلیه روابط آلمتریک ارایه شده در پژوهش پیش رو دارای دقت پیش بینی قابل توجهی بودند. در واقع تابع توانی به عنوان معادله آلمتریک برای برآورد زی توده جنگل های آمیخته در زیست بوم های متفاوت و در شرایط رویشگاهی مختلف دارای تخمین قابل اطمینان با حداقل خطا بود. نکته حائز اهمیت این است که در معادلات ارایه شده در پژوهش پیش رو، رابطه خطی چندگانه به دست آمده تبدیل لگاریتمی مدل توانی است که در باز تبدیل با احتساب فاکتور تصحیح مقادیر زی توده پیش بینی می شود، اما در رابطه با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه و چندمتغیره برای پیش بینی روابط پیچیده زیستی، در اغلب موارد، روابط مذکور دارای خطای محاسباتی و برآوردی غیرقابل اطمینان هستند؛ چون در روابطی مانند رگرسیون خطی چندگانه، روابط بین متغیر هدف و عامل بیشتر به صورت خطی بیان می شوند، در صورتی که شبیه سازی های به دست آمده از شبکه های عصبی مصنوعی روابط غیرخطی موجود بین متغیرهای مستقل و وابسته را در نظر می گیرند و از این رو با افزایش دقت در پیش بینی ها می توانند جایگزین مناسبی برای مدل های مرسوم رگرسیونی در شبیه سازی مؤلفه های جنگل باشند (Pilever Shahri *et al.*, 2011).

بر اساس مقادیر ضریب همبستگی، کمیت های قطر ($r = 0.91$)، ارتفاع ($r = 0.67$) و چگالی ویژه ($r = 0.22$) به ترتیب با شدت های مختلف با مقادیر زی توده همبسته

- Proceedings of the 6th International Conference on Civil Engineering. Isfahan, 5-7 May. 2003: 961- 968 (In Persian).
- Alvarez, E., Duque, A., Saldarriaga, J., Cabrera, K., Salas, G.D.L., Valle, L.D., Lema, A., Moreno, F., Orrego, S. and Rodriguez, L., 2012. Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia. *Forest Ecology and Management*, 267: 297-308.
 - Anonymous, 2008. Glandrood Forest Management Plan, District 3, Noor, Mazandaran. Second Renewal View, General Office of Natural Resources and Watershed Management of Mazandaran Province, Nowshahr, 174p (In Persian).
 - Basuki, T.M., van Laake, P.E., Skidmore, A.K. and Hussin, Y.A., 2009. Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. *Forest Ecology and Management*, 257: 1684-1694.
 - Bayati, H. and Najafi, A., 2013. Performance comparison artificial neural networks with regression analysis in trees trunk volume estimation. *Journal of Forest and Wood Products*, 66(2): 177-191 (In Persian).
 - Bihamta, M.R. and Chahouki, M.A., 2011. Principle of Statistic for the Natural Resources Science. University of Tehran Press, Tehran, 300p (In Persian).
 - Burnham, K.P. and Anderson, D.R., 2002. Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-theoretic Approach. Springer, New York, 488p.
 - Chave, J., Andalo, V., Brown, S., Cairns, M.A., Chambers, J.Q., Eamus, D., Folster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J.P., Nelson, B.W., Ogawa, H., Puig, H., Riera, B. and Yamakura, T., 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145: 87-99.
 - Djomo, A.N., Adamou, I., Joachim, S. and Gode, G., 2010. Allometric equations for biomass estimations in Cameroon and pan moist tropical equations including biomass data from Africa. *Forest Ecology and Management*, 260: 1873-1885.
 - Ekoungoulou, R., Liu, X., Joël Loumeto, J., Averti Ifo, S., Enock Bocko, Y., Koula, F.E. and Niu, S., 2014. Tree allometry in tropical

توجه به نتیجه‌گیری‌های جامع مطالعات Chave و همکاران (۲۰۰۵)، Djomo و همکاران (۲۰۱۰) و Ribeiro و همکاران (۲۰۱۱) در جنگل‌های زیست‌بوم‌های مختلف، می‌توان بیان کرد که با در نظر گرفتن تیپ و ترکیب توده‌های آمیخته راش در رویشگاه‌های مختلف جنگل‌های شمال، با توجه به شرایط رویشگاهی از جمله درجه حرارت و میزان بارندگی، می‌توان از خروجی‌های بهینه پژوهش پیش‌رو برای برآورد زی‌توده هدف با دقت قابل قبولی نسبت به روش‌های رایج دیگر تخمین زی‌توده روی زمینی استفاده کرد. براساس نتایج پژوهش پیش‌رو می‌توان بیان کرد که متغیرهای قطر، ارتفاع و چگالی ویژه در قالب‌های مختلف (ترکیبی و یا متغیرهای مستقل مجزا) به‌عنوان مهم‌ترین عامل‌های لایه ورودی تأثیرگذار برای پیش‌بینی بهینه زی‌توده تجاری جنگل‌های آمیخته راش گلندرود محسوب می‌شوند.

در نتیجه‌گیری نهایی می‌توان بیان کرد که خروجی‌های به‌دست‌آمده از تکنیک شبکه عصبی با استفاده از یک لایه ورودی قطر برابر سینه، دو لایه ورودی قطر و ارتفاع و سه لایه ورودی قطر، ارتفاع و چگالی ویژه به‌ترتیب با کدهای یک، چهار و ۱۰ به‌عنوان بهترین پیش‌بینی‌کننده‌های زی‌توده تجاری توده‌های آمیخته راش گلندرود در جنگل‌های هیرکانی محسوب می‌شوند. به‌منظور جلوگیری از قطع درختان، نمونه‌برداری‌های تخریبی و عدم صرف هزینه و نیروی انسانی گسترده برای دستیابی به مقادیر واقعی زی‌توده تجاری جنگل‌های مورد مطالعه، خروجی‌های بهینه در قالب جعبه‌های سیاه دارای قابلیت کاربرد در سطح وسیعی از جنگل‌های مزبور هستند و علاوه بر صرفه‌جویی در زمان، هزینه و نیروی انسانی، می‌توانند اطلاعات کاملی در رابطه با میزان ذخایر کربن و روند تحولی جنگل در اختیار قرار دهند.

Reference

- Abedini, M. and Poladi, J., 2003. Comparison of artificial neural network by others methods in special estimation of daily rainfall.

- (Case study: Zargham Abad Semirom, Isfahan Province). *Journal of Water and Soil*, 6: 1151-1163 (In Persian).
- Ribeiro, S.C., Fehrmann, L., Pedro Boechat Soares, C., Antônio Gonçalves Jacovine, L., Kleinn, C. and de Oliveira Gaspar, R., 2011. Above- and belowground biomass in a Brazilian Cerrado. *Forest Ecology and Management*, 262: 491-499.
 - 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.
 - Toth, T., Schaap, M.G. and Molnar, Z., 2008. Utilization of soil-plant interrelations through the use of multiple regression and artificial neural network in order to predict soil properties in Hungarian Solonchic grasslands. *Cereal Research Communications*, 36(5): 1447-1450.
 - Vahedi, A. and Mataji, A., 2014. Amount of carbon sequestration distribution associated with oak tree's (*Quercus castaneifolia* C. A. May) bole in relation to physiographical units of Hyrcanian natural forests of Iran. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 4: 716-728 (In Persian).
 - Vahedi, A.A., Mataji, A. and Faraji, F., 2014. Modelling radial and vertical variations of bole wood density of beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in the Caspian forests using artificial neural network technique. *Iranian Journal of Forest*, 4: 483-49 (In Persian).
 - Zhu, B., Wang, X., Fang, W., Piao, S., Shen, H., Zhao, S. and Peng, C., 2010. Altitudinal changes in carbon storage of temperate forests on Mt Changbai, Northeast China. *Journal of Plant Research*, 123: 439-452.
 - Zianis, D. and Mencuccini, M., 2004. On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management*, 187: 311-332.
 - forest of Congo for carbon stocks estimation in above-ground biomass. *Open Journal of Forestry*, 4: 481-491.
 - Foody, G.M., Boyd, D.S. and Cutler, M.E.J., 2003. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. *Remote Sensing of Environment*, 85: 463-474.
 - Hagan, M.T., Demuth, H.B. and Beale, M., 1996. *Neural Network Design*. PWS Publishing Company, USA, 217p.
 - Haykin, S., 1998. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. Prentice Hall Press, USA.
 - Henry, M., Besnard, A., Asante, W.A., Eshun, J., AduBredu, S., Valentini, R., Bernoux, M. and SaintAndré, L., 2010. Wood density, phytomass variations within and among trees and allometric equations in a tropical rainforest of Africa. *Forest Ecology and Management*, 260: 1375-1388.
 - Ketterings, Q.M., Coe, R., Noordwijk, M.V., Ambagau, Y. and Palm, C.A., 2001. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 146: 199-209.
 - Mirabdollahi, M., Bonyad, A.E., Torkaman, J. and Bakhshandeh, B., 2011. Study on tree form of Oriental Beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in different growth stages (Case study: Lomir forest). *Iranian Journal of Forest*, 3: 177-187 (In Persian).
 - Naghdi, R. and Ghajar, I., 2012. Application of artificial neural network in the modeling of skidding time prediction. *Advanced Materials Research*, 403: 3538-3543.
 - Navar, J., 2009. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management*, 257: 427-434.
 - Pilever Shahri, A.R., Ayoubi, S.H. and Khademi, H., 2011. Comparison of artificial neural network (ANN) and multivariate linear regression (MLR) models to predict soil organic carbon using digital terrain analysis,

Simulating commercial biomass in the Hyrcanian mixed-beech stands

A.A. Vahedi

Ph.D. Forestry, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. Email: ali.vahedi60@gmail.com

Received: 08.10.2015

Accepted: 17.01.2016

Abstract

The commercial bole of trees in the mixed-beech forests contributes the majority of biomass and of carbon pool, and is associated with the majority of monetary values in the Hyrcanian forests of Iran. This research aims to accurately predict commercial biomass compared to the allometric equations and field measurements in the third district of Glandroud forests in Noor. After harvesting of the trees, each part of the bole was weighed in the field and wood pieces were extracted from each part. The pieces were then oven-dried, on which the specific wood density was measured. Biomass was simulated by artificial neural network (ANN) including the FFBP network. Allometric equations (logarithmic multiple linear regressions and transformed power function models) with different parameters were examined to study the simulation uncertainty. Diameter at breast height, commercial height and specific wood density (WD) were inputs to the allometric functions and ANN simulation. Architectures of different topology of studied network including transfer functions of Log-sigmoid and Tan-sigmoid with variety of hidden layers and neuron members returned different error estimations of forest commercial biomass. Diameter was one of the most effective factors to predict biomass using ANN. Moreover, increasing height and WD in the ANN reduced the uncertainty of simulation outputs. Adding height and WD with the different combinations in the allometric models increased the accuracy of response variable prediction. The root mean squared errors (*RMSE*) showed that although there was slight differences in the estimation accuracies of ANN and allometric models, the optimal ANN outputs were of lower uncertainty to spatially predict the response variables.

Keywords: Artificial intelligence, carbon sequestration, commercial bole, regression analysis.