فصلنامه علمی – پژوهشی تحقیقات جنگل و صنوبر ایران
جلد ۲۴ شماره ۳، صفحه ۴۶۲-۴۵۱، (۱۳۹۵)

شبیه‌سازی زی‌توده تجاری توده‌های آمیخته راش در جنگل‌های هیرکانی

علی‌اصغر واحدی

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

پست الکترونیک: ali.vahedi60@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹٤/۰۷/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۲۷

چکیده

تنه تجاری درختان جنگل‌های آمیخته راش علاوه‌بر 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 نورون‌های 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 علاوه‌بر قطر، روند قطعیت برآورد افزایش یافت. نتایج نهایی برمبنای 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 نورون 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

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 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 برآوردشده به‌عنوان موجودی ذخایر کربن آلی زی‌توده محسوب می‌شود (Zhu *et al.*, 2010). اگرچه در این خصوص، ضریب کربن محاسباتی زی‌توده درختان

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 این‌رو 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 ازجمله راش، بلوط و گونه‌های دیگر موجود است، از این‌رو پژوهش پیش‌رو به‌دنبال 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 آلومتریک 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 این‌رو، در پژوهش پیش‌رو علاوه‌بر ارایه معادلات آلومتریک، 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 درواقع بیشتر شبکه‌های دیگر مورد استفاده، زیرمجموعه شبکه مذکور هستند (Hagan *et al.*, 1996; Haykin, 1998; Naghdi & Ghajar, 2012). مطالعات زیادی درخصوص استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و مقایسه آن با تحلیل رگرسیون در جنگل‌های طبیعی انجام شده است که ازجمله 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 درنهایت دارای دقت بیشتری برای پیش‌بینی مقادیر زی‌توده بوده

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 درنهایت، شبکه عصبی مصنوعی کاربردی‌تر معرفی شد. در ادامه می‌توان به تحقیق Bayati و Najafi (۲۰۱۳) درخصوص 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 درخصوص 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 به‌منظور دست‌یابی به افزایش دقت پیش‌بینی زی‌توده واقعی تنه تجاری درختان نسبت به روش‌های کلاسیک در توده‌های آمیخته راش جنگل گلندرود 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 گلندرود 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 °۳۶ تا ″۱۵ ′۳۲ °۳۶ شمالی و طول جغرافیایی ″۲۵ ′۵۳ °۵۱ تا ″۲۵ ′۵۷ °۵۱ 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، به‌طوری‌که درختان راش به‌طور آمیخته با بلندمازو، ممرز ، پلت، شیردار، نمدار، آزاد و غیره پراکنش دارند. جهت عمومی در کل سری به‌طور 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 ۳۰ساله ایستگاه هواشناسی نوشهر نشان می‌دهد که میانگین حداکثر و حداقل دما به‌ترتیب 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 نشانه‌گذاری‌شده توسط سازمان‌های اجرایی برای قطع و استحصال انتخاب شدند. با توجه به توزیع قطری در توده‌های نشانه‌گذاری‌شده، 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 به‌طور تصادفی حداقل سه و حداکثر هفت پایه قطع‌شده درنظر گرفته شدند (Henry *et al.*, 2010; Zhu *et al.*, 2010). قبل از قطع درختان، کلیه ویژگی‌های بیوفیزیکی درختان ازجمله قطر برابر سینه و ارتفاع تجاری (ارتفاع تنه از محل قطع کنده تا محلی که تاج شروع می‌شود؛ Basuki *et al.*, 2009) اندازه‌گیری شد. به‌منظور پراکندگی و گستردگی عملیات حجم قطع و تبدیل در عملیات میدانی، داده‌های اندازه‌گیری‌شده در سال ۱۳۹۳ با کلیه داده‌های موجود در آرشیو اسناد دستگاه اجرایی که حاوی داده‌های کمی درختان نشانه‌گذاری‌شده 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 به‌دست‌آمده 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

دیسک، قطعات ثابتی به ابعاد ۲×۲×۲ سانتی‌متر مکعب تکه‌برداری شد و نمونه‌های مزبور در آون به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳ ± ۱۰۲ درجه سانتی‌گراد خشک شدند (Henry *et al.*, 2010; Zhu *et al.*, 2010; Ribeiro *et al.*, 2011). چگالی ویژه (Specific wood density) هریک 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 درنظر گرفته شد.

الگوسازی معادلات آلومتریک

مشاهدات به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری زی‌توده به‌عنوان متغیر هدف (پاسخ) درنظر 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 آلومتریک درنظر گرفته شد. 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 [$CF = \exp(\frac{SEE^2}{2}) \rightarrow CF > 1$] و با استفاده از مدل نمایی بازتبدیلی طبق رابطه ($Y = a \times e^{b \times [\ln a + b \times \mathrm{CF}]^{[lnX]}}$)، مقادیر زی‌توده تجاری جنگل مورد مطالعه برحسب کیلوگرم یا تن برآورد شد (Chave *et al.*, 2005; Djomo *et al.*, 2010; Ribeiro *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 (Bihamta & Chahouki, 2011). درنهایت 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 درصورتی‌که نسبت مشاهدات کل به تعداد پارامترهای محاسباتی بیشتر از ۴۰ بود ($n/k > 40$)، از رابطه ۱ و درصورتی‌که نسبت مذکور کمتر از۴۰ بود، از رابطه ۲ استفاده شد (Burnham & Anderson, 2002):

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

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

که در آن‌ها: n تعداد مشاهدات، RSS مجموع مربعات باقی‌مانده‌ها و k تعداد پارامترهای مدل محاسباتی است.

شبیه‌سازی شبکه عصبی مصنوعی

در استفاده از تکنیک شبکه عصبی مصنوعی برای ارایه 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).

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

در رابطه ۳، x_n متغیر نرمال‌شده، x_i هریک از ورودی‌ها و x_{min} و x_{max} به‌ترتیب 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 به‌تناوب دچار تغییر می‌شوند، تا زمانی‌که 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. درواقع 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 به‌ترتیب در رابطه‌های ۴ و ۵ آمده است.

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

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

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 برمبنای برازش و حداقل میانگین مربعات خطای آزمون داده‌ها است (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

هریک از خروجی‌های ارایه‌شده استفاده شد. درنهایت برای ارزیابی و مقایسه دقت برآوردی مدل‌های به‌دست‌آمده از شبکه عصبی مصنوعی و تحلیل رگرسیون مرتبط با معادلات آلومتریک، از شاخص خطای جذر میانگین مربعات بین مشاهدات و تخمین هریک از مدل‌های آلومتریک (*RMSE*) طبق رابطه ۶ و خروجی‌های شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. کلیه تجزیه و تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای MATLAB و SPSS انجام شد.

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

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

نتایج

جدول ۱ کلیه معادلات به‌دست‌آمده از الگوسازی معادلات آلومتریک برای برآورد زی‌توده توده‌های آمیخته راش منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کلیه شاخص‌های اعتبارسنجی برای هریک از مدل‌های مختلف مقادیر عددی متفاوتی را نشان دادند (جدول ۱). طبق نتایج به‌دست‌آمده، عامل قطر برابر سینه در مدل یک، به‌تنهایی ۸۴ درصد از تغییرات واریانس را شامل شد، درصورتی‌که عامل ارتفاع در مدل دو، با حداقل دقت برآوردی، به‌تنهایی نتوانست به‌عنوان متغیر پاسخگو برای پیش‌بینی زی‌توده تجاری توده آمیخته راش در جنگل گلندرود 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 = ۰/۹۴ ،*RMS* = ۰/۰۵ ،*AIC* = −۵۱۳/۳).

جدول ۱- نتایج تحلیلی معادلات آلومتریک برای برآورد زی‌توده تجاری جنگل آمیخته راش گلندرود

کد	معادله آلومتریک	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 برحسب سانتی‌متر، H: ارتفاع تنه برحسب متر، WD: چگالی ویژه برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب، Y: زی‌توده برحسب کیلوگرم، $Adj.R^2$: ضریب تبیین تعدیل‌شده، *RMS*: میانگین مربعات باقی‌مانده‌ها، *CF*: فاکتور تصحیح، *AIC*: ضریب اطلاعات آکاییک

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 = ۱/۳۸) 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 نورون‌های متفاوت دیده شد. نتایج به‌دست‌آمده از 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.

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

مدل	لایه ورودی	توپولوژی شبکه	تعداد نورون	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

جدول ۳ مقادیر ریشه میانگین مربعات خطای بین مقادیر تخمینی معادلات آلومتریک زی‌توده جنگل و مقادیر واقعی را نشان می‌دهد. مطابق با شاخص‌های اعتبارسنجی معادلات آلومتریک در جدول ۱، مدل‌های نه، شش و پنج به‌ترتیب دارای حداکثر دقت برآورد متغیر هدف بودند.

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

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

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

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
RMSE	۹۶۲/۰۸	۹۵۹/۵۸	۹۶۶/۹۲	۷۶۶/۷۵	۹۵۴/۲۸	۵۴۷/۳۸	۵۷۱/۵۱	۵۵۶/۶۶	۵۴۶/۴۱	۵۱۵/۲۵	۵۹۲/۳۷

بحث

نتایج پژوهش پیش‌رو نشان داد که الگوسازی معادلات آلومتریک 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 آلومتریک به‌طور تقریب شبیه یکدیگر بود. با توسعه الگوسازی انجام‌شده در قالب معادلات آلومتریک 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 آلومتریک 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 آلومتریک، 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.*, 2010; Ribeiro *et al.*, 2011). 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 ارایه‌شده در پژوهش پیش‌رو، نتایج نهایی نشان داد که مدل‌های آلومتریک 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، درنهایت 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;

(Tiryaki & Aydin, 2014).

براساس تحلیل رگرسیون خطی چندگانه، اغلب روابط بین عامل‌های توصیفی و وابسته به‌طور خطی بیان می‌شود، درحالی‌که بین بیشتر مؤلفه‌های بیولوژیکی با توجه به پیچیدگی ارتباط بین آنها، روابط غیرخطی وجود دارد. بدیهی است که مدل‌های توانی یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین مدل‌های غیرخطی رایج در زمینه بیولوژی با حداقل خطای برآورد نسبت به مدل‌های پایه دیگر هستند (Ketterings *et al.*, 2001) که به‌طور معمول به‌عنوان مدل پایه برآورد زی‌توده درختان جنگل محسوب می‌شوند (Zianis & Mencuccini, 2004). به‌همین دلیل کلیه روابط آلومتریک ارایه‌شده در پژوهش پیش‌رو دارای دقت پیش‌بینی قابل توجهی بودند. درواقع تابع توانی به‌عنوان معادله آلومتریک برای برآورد زی‌توده جنگل‌های آمیخته در زیست‌بوم‌های متفاوت و در شرایط رویشگاهی مختلف دارای تخمین قابل اطمینان با حداقل خطا بود. نکته حائز اهمیت این است که در معادلات ارایه‌شده در پژوهش پیش‌رو، رابطه خطی چندگانه به‌دست‌آمده تبدیل لگاریتمی مدل توانی است که در بازتبدیل با احتساب فاکتور تصحیح مقادیر زی‌توده پیش‌بینی می‌شود، اما در رابطه با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه و چندمتغیره برای پیش‌بینی 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 به‌صورت خطی بیان می‌شوند، درصورتی‌که شبیه‌سازی‌های به‌دست‌آمده از شبکه‌های عصبی مصنوعی روابط غیرخطی موجود بین متغیرهای مستقل و وابسته را درنظر می‌گیرند و از این‌رو با افزایش دقت در پیش‌بینی‌ها می‌توانند جایگزین مناسبی برای مدل‌های مرسوم رگرسیونی در شبیه‌سازی مؤلفه‌های جنگل باشند (Pilever Shahri *et al.*, 2011).

براساس مقادیر ضریب همبستگی، کمیت‌های قطر (r =۰/۹۱)، ارتفاع (r =۰/۶۷) و چگالی ویژه (r = ۰/۲۲) به‌ترتیب با شدت‌های مختلف با مقادیر زی‌توده همبسته بودند، اما لزوماً ارتباط بین آنها با مقادیر زی‌توده خطی نبود. از این‌رو اگر متغیرهای مذکور به‌طور مستقیم در روابط خطی چندگانه به‌صورت $Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + ... b_n x_n$ برای برآورد زی‌توده معرفی شوند، دارای خطای زیاد و برآورد غیرقابل قبول هستند. در روند پژوهش پیش‌رو از روابط مذکور برای برآورد زی‌توده استفاده شد، اما به‌دلیل عدم دست‌یابی به دقت قابل ملاحظه، از ارایه تحلیلی آن خودداری شد. یکی از مهم‌ترین مزایای استفاده از تکنیک شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی متغیرهای پاسخ که اندازه‌گیری آنها بسیار مشکل، زمان‌بر و پرهزینه است، درنظر گرفتن کلیه روابط غیرخطی در بوم‌سازگان‌های طبیعی است. درواقع علت استفاده از شبکه عصبی در پژوهش پیش‌رو این است که سیستم مورد استفاده، Function approximator است؛ یعنی حداقل نظم بین داده‌های ورودی و خروجی در این سیستم درنظر گرفته شده است که در دقت پیش‌گویی تأثیر به‌سزایی دارد. از این‌رو چون شبکه عصبی، همبستگی بین متغیرهای توصیفی با یکدیگر و متغیر خروجی، نوع روابط بین آنها و همچنین وضعیت تقارن توزیع داده‌ها را دربرگرفته است و موانع مذکور را طی هر الگوریتم آموزش، پس از تثبیت وزن‌دهی اولیه داده‌ها، برطرف می‌کند و علاوه‌برآن برخلاف تحلیل‌های رگرسیون دارای محدودیت‌های مدل‌سازی نیست، از این‌رو تکنیک مذکور یک جایگزین مناسب و درخور توجه برای رقابت با معادلات آلومتریک برای پیش‌بینی بهینه مقادیر زی‌توده درختان محسوب می‌شود.

در پژوهش پیش‌رو مدل آلومتریک بازنمایی $Y = [\mathrm{Exp}((lnY = b_0 + b_1 \ln(D^2 \times H) + b_2 \ln(WD))] \times CF$ به‌عنوان مدل بهینه نهایی محسوب شد که در مقایسه با مدل‌های آلومتریک دیگر برمبنای مقدار *RMSE* دارای حداقل خطای برآوردی بود. در رابطه با شبیه‌سازی به‌دست‌آمده از شبکه عصبی مصنوعی با ورود سه لایه ورودی قطر، ارتفاع و چگالی ویژه با یک لایه پنهان، خروجی به‌دست‌آمده دارای بیشترین دقت پیش‌بینی زی‌توده جنگل آمیخته راش در منطقه مورد مطالعه محسوب شد. با

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 درنظر گرفتن تیپ و ترکیب توده‌های آمیخته راش در رویشگاه‌های مختلف جنگل‌های شمال، با توجه به شرایط رویشگاهی ازجمله درجه‌حرارت 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 کاربردی در سطح وسیعی از جنگل‌های مزبور هستند و علاوه‌بر 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. 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

(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 Hungrian Solonetzic 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., Dcmuth, 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 abone-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.