DOI: http://dx.doi.org/10.22092/ijfpr.2014.10668

فصلنامه علمی - پژوهشی تحقیقات جنگل و صنوبر ایران
جلد ۲۲ شماره ۲، صفحه ۲۳۶-۲۲۵، (۱۳۹۳)

تبیین مدل‌های محاسباتی و بهینه زی‌توده تنه ممرز (*Carpinus betulus* L.) با استفاده از معادلات آلومتریک در جنگل‌های هیرکانی

علی‌اصغر واحدی*

* نویسنده مسئول، دانش‌آموخته دکتری، گروه جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران.
پست الکترونیک: ali.vahedi60@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۶/۱۴ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۰/۰۸

چکیده

برآورد هرچه دقیق‌تر زی‌توده در جنگل‌های طبیعی در رابطه با انتشار کربن اتمسفری گامی مؤثر به‌منظور اجماع سیاست‌های جهانی برای مواجهه با پدیده گرمایش زمین و تغییرات اقلیم است. ازاین‌رو پژوهش پیش‌رو با مدل‌سازی معادلات آلومتریک کاربردی در پی افزایش دقت اندازه‌گیری زی‌توده تنه ممرز به‌عنوان فراوانترین گونه درختی جنگل‌های هیرکانی در شمال ایران است. برای مدل‌سازی از سه متغیر قطر برابرسینه، ارتفاع تنه و سن به‌عنوان متغیر مستقل در مدل‌های غیرخطی (توانی و نمایی) و به‌صورت ترکیبی در مدل‌های خطی لگاریتمی تغییرشکل‌یافته استفاده شد. نتایج نشان داد که درمیان مدل‌های غیرخطی، به‌ترتیب مدل توانی و نمایی برحسب قطر برابرسینه دارای بهترین برازش و بیشترین دقت محاسباتی بودند (۰/۵۱- ۰/۵۳ = SEE ; ۰/۷۵- ۰/۷۲ = R^2_{adj}). در بین کلیه متغیرهای ترکیبی، مربع قطر برابرسینه و ارتفاع تنه ($dbh^2 \times h$) به‌عنوان بهترین ترکیب با بیشترین همبستگی با مشاهدات، معرفی شد و ازمیان کلیه مدل‌های خطی مذکور، مدل لگاریتمی برحسب ترکیب ذکرشده دارای بیشترین دقت برآوردی (SEE =۰/۴۸ ; R^2_{adj} =۰/۷۷) و مناسبترین برازش بود. باتوجه به فاکتور تورم واریانس محاسباتی (VIF <۱۰)، ارائه مدل‌های خطی چندمتغیره از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. درنهایت باتوجه به حداقل ضریب تصحیح محاسبه‌شده در این تحقیق (CF = ۱/۱۱)، خطای سیستماتیک ناشی از کاهش محاسباتی جبران شده و مدل آلومتری بهینه برای محاسبه زی‌توده تنه ممرز $Y = Exp[-۳/۴۷ + ۱/۰۰۷ \ln(dbh^2 \times h)]$ معرفی شد.

واژه‌های کلیدی: گرمایش زمین، زی‌توده تنه، برازش، ممرز، مدل‌های آلومتری.

مقدمه

تغییرات اقلیم یکی از مهمترین چالش زیستی دهه‌های اخیر محسوب می‌شود که به‌سبب آن آگاهی و اطلاعات در رابطه با میزان هرچه دقیق‌تر زی‌توده‌های گیاهی جنگل‌های مناطق مختلف باید افزایش پیدا کند تا به‌واسطه آن بتوان به سیاست کلی کنترل و کاهش تغییرات آب‌وهوایی در سطح جهان پرداخت (Djomo *et al*., 2010). افزایش گازهای گلخانه‌ای و به‌ویژه افزایش میزان دی‌اکسید کربن در اتمسفر یکی از دلایل افزایش درجه‌حرارت کره زمین و تغییرات اقلیم محسوب می‌شود (Han *et al*., Li & Tang, 2006; 2005)، ازاین‌رو با اندازه‌گیری میزان زی‌توده جنگل به‌نوعی می‌توان به میزان انتشار کربن در اتمسفر پی برد

(Ribeiro *et al*., 2011; Houghton *et al*., 2009). جنگل‌های طبیعی شمال ایران یکی از مهمترین ذخایر ژنتیکی بیوسفر زمین به‌شمار می‌روند و با قدمتی بیش از یک میلیون سال جزء جنگل‌های طبیعی و کهن عرصه‌های جهانی محسوب می‌شوند (Marvie Mohajer, 2005). این جنگل‌ها یکی از مهمترین و بزرگترین ذخایر زی‌توده‌های گیاهی و کربن جهان هستند که سهم عمده‌ای را در ترسیب کربن اتمسفری برعهده دارند. ممرز (*Carpinus betulus* L.) به‌دلیل اینکه یکی از فراوان‌ترین درختان جنگل‌های شمال ایران محسوب می‌شود و پراکنش آن از مناطق پایین‌دست تا ارتفاعات کوهستانی جنگل‌های مذکور سهم قابل‌توجهی از زی‌توده گیاهی را به‌خود اختصاص می‌دهد (Marvie Mohajer, 2005)، برای این تحقیق انتخاب شد.

مطالعات زی‌توده گیاهی به‌ویژه درختان، علاوه بر اینکه زمان خیلی زیاد و هزینه‌های طاقت‌فرسایی را می‌طلبد، بیشتر در سطوح کوچک انجام می‌شود و منابع اطلاعاتی آن نیز نسبت به سایر مطالعات انجام‌شده کمتر است (Ketterings *et al*., 2001; Fehrmann & Kleinn, 2006). ازاین‌رو استفاده از معادلات آلومتریک در قالب مدل‌های مختلف رگرسیونی در سطوح خیلی وسیع می‌تواند برای برآورد هرچه دقیق‌تر زی‌توده درختی مفید واقع شود. درواقع معادلات آلومتریک همان رابطه بین زی‌توده درختان و یکسری از ویژگی‌های زیستی و فیزیکی درختان ازقبیل قطر برابرسینه و ارتفاع تنه درختان هستند که قابلیت تجاری دارند (Basuki *et al*., 2009). البته مدل‌هایی که علاوه‌بر قطر و ارتفاع، سایر متغیرهای قابل‌اندازه‌گیری درختان را نیز موردتوجه قرار داده‌اند، دارای دقت بیشتری نسبت به بقیه موارد هستند (Joosten *et al*., 2004; Alvarez *et al*., 2012). با توجه به نتایج اکثر مطالعات انجام‌شده، معمولاً مدل‌های پایه به‌منظور برآورد زی‌توده هوایی (Above-ground biomass) مدل توانی معرفی شده‌اند. قالب این معادله به‌صورت $Y= ax^b$ است که در آن Y مقدار زی‌توده هوایی، x متغیر مستقل مانند قطر برابرسینه، b توان و a شیب مدل است (Djomo *et al*., 2010; Fehrmann & Kleinn, 2006; Zianis & Mencuccini, 2004). همچنین به این دلیل که برای برازش هر چه بهتر و برآورد دقیق‌تر درصورت ورود متغیرهای ترکیبی (مانند قطر و ارتفاع)، مدل مذکور به‌صورت لگاریتمی تغییر شکل پیدا می کند که برای بازتبدیل آن از مدل نمایی [$Y = bExp(ax)$] استفاده می‌شود (Djomo *et al*., 2010; Rebeiro *et al*., 2011)، ازاین‌رو مدل نمایی نیز به‌عنوان مدل پایه در مقایسه با مدل توانی برای برآورد زی‌توده مورداستفاده قرار می‌گیرد.

باتوجه به اینکه در پژوهش پیش‌رو هدف ارائه مدل‌های آلومتری بهینه برای اندازه‌گیری هرچه دقیق‌تر ترسیب کربن در راستای کاهش انتشار CO_2 اتمسفری است، بنابراین زی‌توده جزء کلان گونه ممرز یعنی وزن خشک تنه برای ارزیابی موردتوجه قرار گرفت. ازآنجایی‌که وزن تنه حدود ۸۰ درصد از وزن کل درخت را به‌خود اختصاص می‌دهد، برآورد میزان زی‌توده تنه ارجحیت دارد (Vann *et al*., 1998). Henry و همکاران (۲۰۱۰) نیز بیان کردند که تنه درختان بیشترین زی‌توده هوایی مربوط به یک درخت را به‌خود اختصاص می‌دهد. همچنین Navar (۲۰۰۹) نیز بیان می‌کند که اندازه‌گیری زی‌توده تنه نسبت به دیگر اجزاء درختان از جمله برگ‌ها و شاخه‌ها علاوه‌براین‌که دارای مقادیر خیلی بیشتری است، دارای دقت بیشتری نیز می‌باشد.

هدف تحقیق پیش‌رو ارائه مدل‌های جدید آلومتریک تک‌گونه (Species-specific allometric equation) با استفاده از متغیرهای بیوفیزیکی درختان برای برآورد هرچه دقیق‌تر زی‌توده تنه گونه ممرز به‌منظور مدیریت صحیح و پیش‌بینی توان تولیدی و مقدار ترسیب کربن در جنگل‌های طبیعی شمال ایران است.

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه موردمطالعه

این تحقیق در سری سه جنگل گلندرود نور واقع در حوضه آبخیز ۴۸ جنگل‌های شمال ایران انجام شد. مساحت کل این سری ۱۵۲۱ هکتار است و محدوده این سری معروف به سری سه سرگلند بین عرض جغرافیایی ۳۰ ۲۷ ۳۶ تا ۱۵ ۳۲ ۳۶ و طول جغرافیایی ۲۵ ۵۳ ۵۱ تا ۲۵ ۵۷ ۵۱ قرار گرفته است. ارتفاع از سطح دریا در این سری بین ۹۴۰ تا ۱۵۲۰ متر است و گونه ممرز به‌صورت آمیخته با بلوط، راش، پلت و نمدار پراکنش دارد. محدوده‌های نمونه‌برداری برای توزین درختان ممرز از پارسل‌های شماره دو و چهار این سری بود که عملیات قطع در آنها توسط دستگاه‌های اجرایی در بهمن سال ۱۳۸۹ انجام شد. جهت‌های عمومی در کل سری به‌صورت غربی و جنوب‌غربی است و بیشترین شیب منطقه در برخی نقاط تا ۸۰ درصد نیز می‌رسد. همچنین سنگ‌مادر آهک- مارن است و تیپ خاک نیز قهوه‌ای جنگلی تا راندزین می‌باشد (Anonymous, 2008). براساس جدیدترین آمار هواشناسی (۳۰ سال گذشته) نزدیکترین ایستگاه هواشناسی واقع در شهرستان نوشهر، میانگین بیشینه و کمینه دما به‌ترتیب در اواسط مرداد تا اواخر شهریور به‌میزان ۲۸/۸ و در بهمن به‌میزان ۳/۹ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. متوسط بارندگی سالانه ۱۲۹۳/۵ میلی‌متر است که میانگین حداقل آن در مردادماه و میانگین حداکثر آن در اواخر آبان‌ماه تا اوایل آذرماه گزارش شده است.

روش پژوهش

بیست و چهار درخت ممرز برای قطع و استحصال، توزین و نمونه‌برداری انتخاب شد که مبنای انتخاب آنها براساس طبقه‌های قطری بود (Aboal *et al*., 2005). در این خصوص سه طبقه قطری رایج در جنگل‌های طبیعی شمال ایران که عبارتند از ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر، ۶۰ تا ۸۰ سانتی‌متر و بیشتر از ۸۰ سانتی‌متر برای تفکیک انتخاب شدند (Marvie Mohajer, 2005; Mirabdollahi *et al.,* 2011). سپس در هنگام نشانه‌گذاری طبقه‌های قطری مختلف درختان درنظر گرفته شد و از هر طبقه به‌طور تصادفی هشت پایه برای قطع درنظر گرفته شد (Henry *et al*., 2010; singh *et al*., 2011; Zhu *et al*., 2010). به‌منظور اندازه‌گیری زی‌توده تنه، حین استحصال از انتهای هر قسمت از گرده‌بینه حاصل‌شده در صورت امکان پس از اندازه‌گیری طول تنه به‌ازای دو تا پنج متر (Aboal *et al*., 2005; Henry *et al*., 2010; Zhu *et al*., *al*., 2005) یک دیسک کامل به‌ضخامت دو سانتی‌متر برداشت شد (Peichl & Arain, 2006; Zhu *et al.,* 2010). درکل به‌طور متوسط از هر پایه افتاده سه تا پنج دیسک برداشت شد و دیسک‌های برداشت‌شده پس از جمع‌آوری توزین شدند. پس از آماده‌سازی سطح هریک از نمونه‌های دیسک و برخی از قطاع‌های حاصل از دیسک توسط سمباده، با استفاده از بینوکولار و میز Lintab 6 پهنا و تعداد حلقه‌های رویش سالانه دیسک‌های مربوطه برای تعیین سن دقیق هر یک از پایه‌های نمونه‌برداری‌شده موردارزیابی و شمارش قرار گرفتند. وضوح هرچه بیشتر حلقه‌های دیسک با مرطوب‌کردن سطح زیر پوشش بینکولار میسر شد. البته به‌دلیل عدم‌وجود قابل‌ملاحظه حلقه‌های کاذب و ناقص از روش استانداردسازی تاریخ‌گذاری تطبیقی صرف‌نظر شد. در ادامه، از دو طرف مخالف دیسک برای تعیین ضریب خشکی قطعاتی با ابعاد مساوی (۲×۲×۲ سانتی‌متر مکعب) تکه‌برداری شد (Rebeiro *et al*., 2011). همچنین کل آن قسمت از تنه‌هایی که دیسک از آن جدا شد، در عرصه به‌وسیله ترازو با ظرفیت ۶۵۰ کیلوگرم وزن شدند. تنه‌هایی که خیلی قطور و حجیم بودند و از ظرفیت ترازو خارج بودند، به بخش‌های کوچکتر تقسیم شدند و توزین شدند. کلیه نمونه‌های چوبی برداشت‌شده پس از تکه‌برداری و انتقال به آزمایشگاه در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند تا به وزن ثابت برسند (Aboal *et al*., 2005; Zhu *et al*., 2010; Henry *et al.*, 2010; Rebeiro *et al*., 2011). وزن خشک زی‌توده تنه از مجموع وزن هر بخش از تنه با توجه به ضریب نسبت وزن خشک به وزن تر نمونه‌های مرتبط به دیسک‌های برداشت‌شده از هر بخش

به‌دست آمد (Zhu *et al*., 2010 ; Navar, 2009). پنجاه درصد از وزن زی‌توده محاسبه‌شده به‌عنوان میزان ذخیره کربن موجود در تنه درنظر گرفته شد (Brown & Lugo, Singh *et al*., 2011; Alvarez 1982; Zhu *et al*., 2010 ;*et al*., 2012).

تجزیه‌وتحلیل آماری

به‌منظور مدل‌سازی زی‌توده تنه درختان ممرز، سه متغیر اصلی قطر برابرسینه، ارتفاع تنه و سن درخت برای برازش مدل‌ها مورداستفاده قرار گرفتند (Chave *et al*., 2005; Basuki *et al*., 2009; Joosten *et* al., 2004; Turski *et al*., 2008). با توجه به بررسی‌های وسیع انجام‌شده از کمیت‌های یادشده با ترکیب‌های مختلف تحت‌عنوان متغیرهای ترکیب‌یافته (Zianis & Mencuccini, 2004; Djomo *et al.,* 2010; Alvarez *et al.,* 2012) نیز در مدل‌های آلومتریک مختلف استفاده شد. مدل‌های آلومتری زی‌توده تنه برمبنای حداقل‌مربعات موردبرازش قرار گرفتند. در این تحقیق به‌منظور مدل‌سازی از مدل‌های توانی، نمایی و لگاریتمی تغییرشکل‌یافته استفاده شد.

در مدل‌های توانی و نمایی، برازش داده‌ها براساس کمیتی که به‌عنوان متغیر مستقل (قطر برابرسینه یا ارتفاع یا سن درخت) قرار می‌گیرد، به‌صورت غیرخطی نشان داده می‌شود. درصورتی‌که مدل خطی لگاریتمی تغییرشکل‌یافته، برازش مشاهدات واقعی را به‌صورت خطی نشان می‌دهد. در این میان نکته حائز اهمیت این است که مدل لگاریتمی تغییرشکل‌یافته ارائه‌شده، همان مدل تغییرشکل‌یافته مدل توانی از طریق تبدیل لگاریتم طبیعی (Natural logarithm/ Ln) است. تبدیل لگاریتمی باعث ایجاد خطای سیستماتیک یا کاهش محاسباتی می‌شود که درنهایت در بازتبدیل با محاسبه عامل تصحیح (Correction factor) کاهش محاسباتی مذکور برطرف می‌شود (Djomo *et al*., 2010; Henry *et al*., 2010). ازاین‌رو به‌منظور بررسی تغییرات و تبیین کفایت مدل‌های مربوطه، عامل تصحیح با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (Chave *et al*., 2005; Rebeiro *et al*., 2011):

$$CF = \exp (SEE^2 / 2) \qquad CF > ۱ \qquad \text{رابطه } ۱$$

در این رابطه CF و SEE به‌ترتیب ضریب‌تصحیح و اشتباه‌معیار برآورد رگرسیون هستند. اعتبارسنجی هر یک از مدل‌های معرفی‌شده براساس آزمون t ضرایب به‌دست‌آمده، ضریب‌تبیین تطبیق‌یافته (R^2_{adj})، میانگین مربعات باقی‌مانده‌ها و عامل تصحیح (CF) انجام شد (Chave *et al*., 2005; Basuki *et al*., 2009; Djomo *et al*., 2010; Rebeiro *et al*., 2011). محاسبات آماری توسط نرم‌افزار $SPSS_{17.0}$ انجام شد.

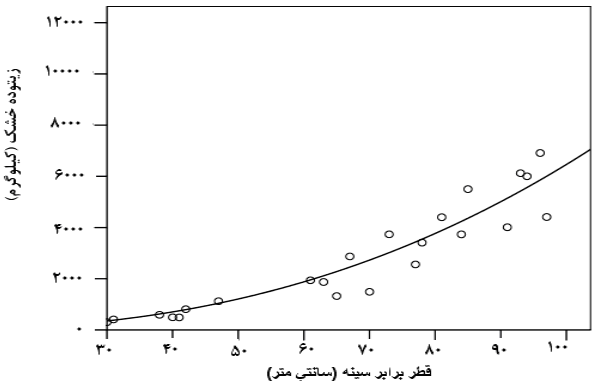
نتایج

ابتدا فقط از متغیر قطر برابرسینه برای برازش مدل‌های توانی و نمایی استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده در این رابطه نشان داد که مدل توانی و سپس مدل نمایی برحسب قطر برابرسینه دارای بیشترین ضریب‌تبیین و بیشترین دقت هستند (R^2_{adj} = ۰/۷۲ –۰/۷۵ ; SEE = ۰/۵۳ –۰/۵۱) (جدول ۱). در مرحله دوم فقط از ارتفاع کل تنه درختان موردبرداشت برای برازش و تخمین مدل‌های توانی و نمایی استفاده شد که به‌دلیل ضریب‌تبیین کم و عدم‌دقت کافی و برازش نامناسب و غیرقابل‌قبول از ارائه آن صرف‌نظر شد. در گام بعدی از متغیر سن استفاده شد که طبق نتایج قابل‌مشاهده در جدول ۱، مدل‌های معرفی‌شده برحسب سن دارای دقت کمتری نسبت به مدل‌های به‌دست‌آمده برحسب قطر برابرسینه هستند (SEE = ۰/۶۸ –۰/۶۱ ; ۰/۵۵– R^2_{adj} = ۰/۶۳). با توجه به نتایج به‌دست‌آمده (جدول ۱) و شکل‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ می‌توان دریافت که به‌ترتیب مدل‌های توانی و نمایی برحسب قطر برابرسینه دارای بیشترین دقت و بهترین برازش هستند، درصورتی‌که مدل نمایی برحسب سن دارای ضعیف‌ترین و نامناسب‌ترین برازش درمیان کلیه مدل‌های غیرخطی ارائه‌شده است. در کلیه مدل‌های ارائه‌شده نتایج حاصل از آزمون t نشان داد که ضرایب محاسباتی به‌صورت معنی‌داری دارای اعتبارند ($P < 0.01$).

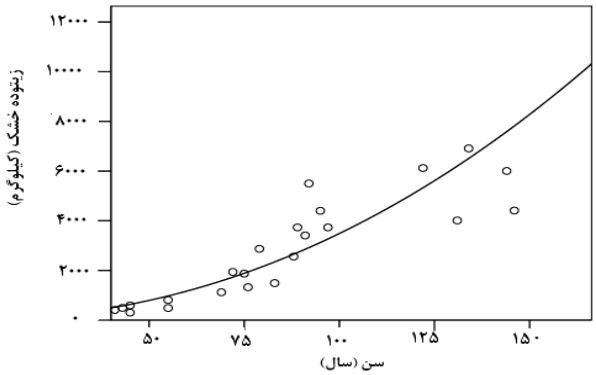
جدول ۱- نتایج تحلیلی پارامترهای مدل‌های غیرخطی تک‌متغیره آلومتری برای تعیین مدل بهینه زی‌توده تنه ممرز

مدل‌های آلومتری	ضرایب مدل		$Adj.R^2$	SEE	RMS	CF
	b	a				
$Y = a(dbh)^b$	۲/۴۱	۰/۰۹۵	۰/۷۵	۰/۵۱	۰/۲۵۲	-
$Y = a(age)^b$	۲/۱۳	۰/۱۸	۰/۶۳	۰/۶۱	۰/۳۷۹	–
$Y = b\ Exp\ [a(dbh)]$	۰/۰۴	۱۴۵/۵۷	۰/۷۲	۰/۵۳	۰/۲۹۱	–
$Y = b\ Exp\ [a(age)]$	۰/۰۲۴	۲۷۳/۵۲	۰/۵۵	۰/۶۸	۰/۴۶۶	–

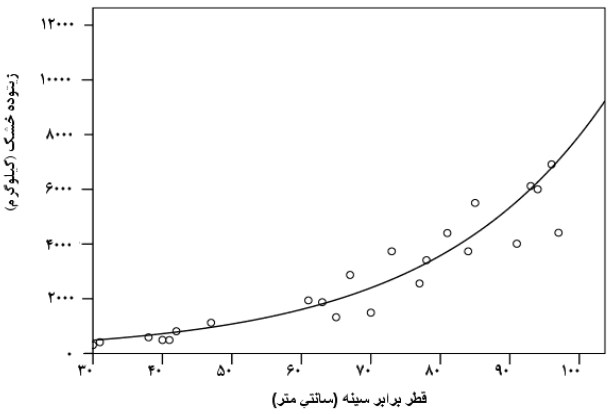
dbh: قطر برابرسینه (سانتی‌متر)، age: سن (سال)، a: ضریب ثابت، b: ضریب متغیر، $Adj.R^2$: ضریب‌تبیین تطبیق‌یافته، SEE: اشتباه‌معیار برآورد رگرسیون، RMS: میانگین مربعات باقی‌مانده‌ها، CF: ضریب‌تصحیح. کلیه ضرایب در سطح $P < 0.01$ معنی‌دارند.



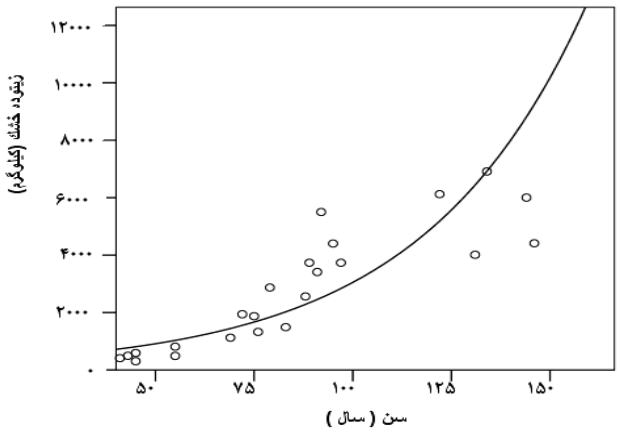
شکل ۱- برازش منحنی مدل توانی زی‌توده تنه ممرز با استفاده از قطر برابرسینه



شکل ۲- برازش منحنی مدل توانی زی‌توده تنه ممرز با استفاده از سن



شکل ۳- برازش منحنی مدل نمایی زی‌توده تنه ممرز با استفاده از قطر برابرسینه



شکل ۴- برازش منحنی مدل نمایی زی‌توده تنه ممرز با استفاده از سن

به‌منظور مدل‌سازی آلومتری توسط متغیرهای ترکیبی برای تعیین دقت و میزان برازش از مدل‌های تغییرشکل‌یافته لگاریتمی به‌عنوان مدل‌های خطی استفاده شد. درمیان کلیه متغیرهای مورداستفاده که با ترکیب‌های مختلف وارد مدل‌های مذکور شدند، ترکیب ($dbh^2 \times h$) دارای حداکثر همبستگی با مشاهدات بود و مدل حاوی متغیر مذکور دارای

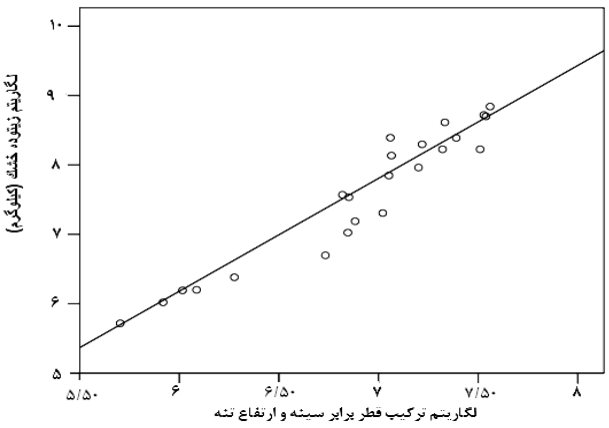
حداکثر دقت و بهترین برازش می‌باشد که در جدول ۲ ضرایب هر یک از مدل‌ها و شاخص‌های اعتبارسنجی آنها نمایش داده شده است. نتایج حاصل از آزمون t نشان داد که ضرایب مربوطه به‌صورت معنی‌داری دارای اعتبار محاسباتی هستند ($P < 0.01$).

جدول ۲- نتایج تحلیلی پارامترهای مدل‌های خطی لگاریتمی آلومتری برحسب متغیرهای ترکیبی برای تعیین مدل بهینه زی‌توده تنه ممرز

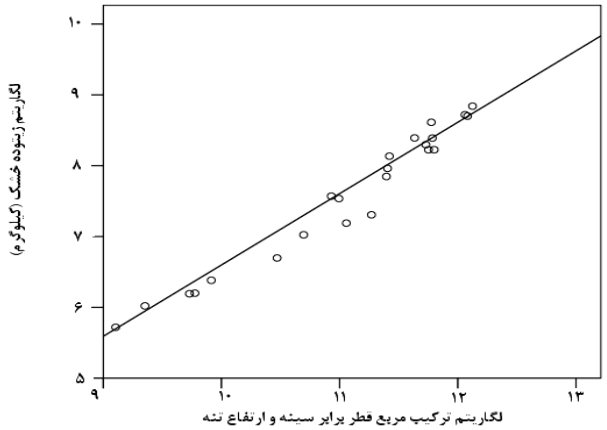
مدل‌های آلومتری	ضرایب مدل		$Adj.R^2$	SEE	RMS	CF
	b	a				
$lnY = a + b \ln (dbh \times h)$	۱/۶۲	-۳/۵۷	۰/۷۴	۰/۵۱	۰/۲۶۸	۱/۱۳
$lnY = a + b \ln (dbh^2 \times h)$	۱/۰۰۷	-۳/۴۷	۰/۷۷	۰/۴۸	۰/۲۳۲	۱/۱۱
$lnY = a + b \ln (dbh^2 \times age)$	۰/۷۸	-۲/۳۱	۰/۷۲	۰/۵۲	۰/۲۸۱	۱ /۱۴
$lnY = a + b \ln (dbh^2 \times h \times age)$	۰/۷۱	-۳/۲۴	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۲۵۱	۱/۱۳

dbh: قطر برابرسینه (سانتی‌متر)، age: سن (سال)، h: ارتفاع تنه (متر)، a: ضریب ثابت، b: ضریب متغیر، $Adj.R^2$: ضریب‌تبیین تطبیق‌یافته، SEE: اشتباه‌معیار برآورد رگرسیون، RMS: میانگین مربعات باقی‌مانده‌ها، CF: ضریب‌تصحیح. کلیه ضرایب در سطح $P < 0.01$ معنی‌دارند.

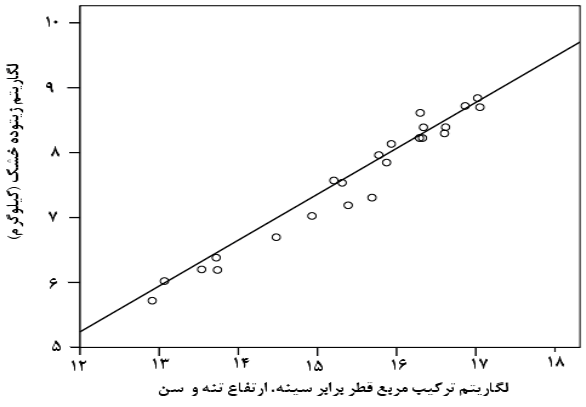
جالب‌توجه است که با افزایش سن به ترکیب متغیرهای مدل مذکور ($dbh^2 \times h \times age$) نه‌تنها به دقت مدل افزوده نمی‌شود، بلکه نتیجه‌ای وارونه دارد (SEE = ۰/۵۰ ، R^2_{adj} =۰/۷۵). شکل‌های ۵، ۶، ۷ و ۸ برازش هریک ازمدل‌های خطی لگاریتمی برحسب متغیرهای ترکیبی را نشان می‌دهد که ازبین منحنی‌های مربوطه، منحنی شکل ۷ دارای نامناسبترین برازش و شکل ۶ دارای بهترین برازش است.



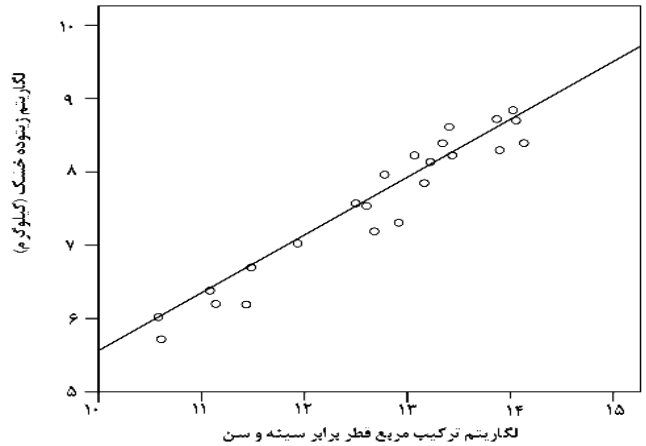
شکل ۵- منحنی برازش مدل لگاریتمی خطی زی‌توده تنه ممرز با استفاده از لگاریتم ترکیب قطر برابرسینه (سانتی‌متر) و ارتفاع تنه (متر)



شکل ۶- منحنی برازش مدل لگاریتمی خطی زی‌توده تنه ممرز با استفاده از لگاریتم ترکیب مربع قطر برابرسینه (سانتی‌متر) و ارتفاع تنه (متر)



شکل ۷- منحنی برازش مدل لگاریتمی خطی زی‌توده تنه ممرز با استفاده از لگاریتم ترکیب مربع قطر برابرسینه و سن



شکل ۸- منحنی برازش مدل لگاریتمی خطی زی‌توده تنه ممرز با استفاده از لگاریتم ترکیب مربع قطر برابرسینه، ارتفاع تنه و سن

بحث

در تحقیق پیش‌رو تبیین مدل‌های محاسباتی زی‌توده تنه خشک ممرز با استفاده از مدل‌سازی آلومتری از ترکیب سه متغیر اصلی شامل قطر برابرسینه، ارتفاع کل تنه و سن درخت انجام شد. در فرایند اول مدل‌سازی فقط از قطر برابرسینه، ارتفاع و سن استفاده شد و رگرسیون‌های انتخابی در این رابطه مدل‌های توانی و نمایی معرفی شدند. دربین متغیرهای استفاده‌شده، قطر برابرسینه و سن به‌ترتیب در مدل توانی و سپس در مدل نمایی دارای حداکثر دقت و بهترین برازش مشاهدات بودند. تحقیقات زیادی نیز به این نتیجه رسیده‌اند که درمیان متغیرهای مستقل مدل‌های آلومتریک معمولاً قطر برابرسینه به‌عنوان باارزشترین متغیر محسوب می‌شود، چراکه هم همبستگی خیلی زیاد با زی‌توده دارد و هم اندازه‌گیری آن نسبت به دیگر متغیرهای مستقل آسان‌تر است (Segura & Kanneinen , 2005; Ribeiro *et al.*, 2011). سن درخت مهمترین متغیر مستقل (تک متغیر) پس از قطر برابرسینه در پیش‌بینی زی‌توده تنه ممرز معرفی شد، ولی ارتفاع کل درخت دارای کمترین ارزش محاسباتی برای تعیین زی‌توده ممرز می‌باشد. توجیه ساده در رابطه با این موضوع همبستگی بین قطر برابرسینه و زی‌توده ($R = ۰/۶۱۱$; $P < 0.01$) و همبستگی بین سن درخت و زی‌توده ($R = ۰/۵۴۹$; $P< 0.01$) است، بنابراین باتوجه به اینکه همبستگی معنی‌داری بین ارتفاع کل تنه و زی‌توده تنه وجود ندارد ($P > 0.05$)، به‌عنوان یک متغیر مستقل دارای عدم ارزش محاسباتی برای تعیین زی‌توده تنه ممرز می‌باشد. با توجه به این موضوع و نتایج موجود در جدول ۱ به‌راحتی می‌توان دریافت که با توجه به اینکه متغیر قطر برابرسینه مهمترین متغیر مستقل با بیشترین ارزش محاسباتی برای زی‌توده تنه خشک ممرز معرفی شد، ازاین‌رو کلیه متغیرهای بیوفیزیکی که دارای بیشترین همبستگی با قطر برابرسینه می‌باشند، می‌توانند به‌عنوان متغیر عامل (Explanatory variable) در محاسبه زی‌توده در مدل‌های بیولوژیکی (توانی و نمایی) محسوب شوند (Ketterings *et al.*, 2001). در تحقیق پیش‌رو بین متغیر قطر و سن همبستگی معنی‌دار و خیلی زیاد وجود دارد ($R =۰/۹۴۶$; $P < 0.01$) درصورتی‌که بین قطر و ارتفاع همبستگی خیلی ضعیف‌تری وجود دارد ($R =۰/۴۷۹$; $P < 0.05$) و به همین دلیل است که ارتفاع نسبت به سن دارای ارزش محاسباتی خیلی کمتری برای برآورد زی‌توده تنه ممرز می‌باشد که متعاقباً در این تحقیق از ارائه مدل‌های توانی و نمایی مشتمل بر ارتفاع به‌دلیل دقت خیلی کم صرفنظر شد. معمولاً فراوانترین و مهمترین مدل‌های کاربردی در اکثر مطالعات بیولوژی

ازجمله پژوهش‌های مربوط به برآورد زی‌توده‌های گیاهی مدل توانی است (Zianis & Vallet *et al*., 2006; Kettering *et al*, 2001; Mencuccini, 2004). در این مورد می‌توان به تحقیق Sohrabi و Shirvani (۲۰۱۲) اشاره کرد که برای بررسی زی‌توده هوایی درختان بنه در پارک ملی خجیر مدل‌های توانی و نمایی موردمقایسه قرار گرفتند که درنتیجه مدل‌های توانی بهترین مدل برای تعیین زی‌توده هوایی بنه معرفی شدند، ولی برخلاف تحقیق پیش‌رو، ارتفاع مهمترین عامل تأثیرگذار در مدل مورداستفاده معرفی شد. یکی از مهمترین دلایل اختلاف دامنه قطری و ارتفاعی بکاررفته برای بنه و درختان ممرز و عامل دوم تفاوت در شکل ظاهری درختان و چگالی چوب است که به‌ویژه در درختان بنه می‌تواند در قسمت‌های مختلف متفاوت باشد. مطالعات مختلفی دریافتند که در مدل توانی برحسب قطر برابرسینه برای برآورد زی‌توده به‌طور تجربی توان مدل (b) بین ۲/۳۶ تا ۲/۶۷ می‌باشد (Djomo Alvarez *et al.,* 2010; Zianis & Mencuccini, 2004 *et al.,* 2012;) که نتیجه به‌دست‌آمده در تحقیق پیش‌رو (b = ۲/۴۱) کاملاً منطبق با دامنه استاندارد معرفی‌شده برای مطالعه برآورد زی‌توده تنه خشک ممرز در جنگل‌های هیرکانی است (جدول ۱).

در گام بعدی مراحل مدل‌سازی برای دستیابی به حداکثر دقت و بهترین برازش به‌منظور برآورد صحیح‌تر زی‌توده تنه ممرز از متغیرهای ترکیبی استفاده شد که برای نمایش برازش هریک از مدل‌ها برحسب متغیرهای مذکور از مدل لگاریتمی تغییرشکل‌یافته مدل توانی استفاده شد. نتایج نشان داد که ترکیب مربع قطر برابرسینه و ارتفاع تنه ($dbh^2 \times h$) به‌عنوان بهترین ترکیب دارای بیشترین ارزش محاسباتی برای نمایش برازش مشاهدات و برآورد زی‌توده تنه ممرز می‌باشد. مطالعات مختلفی نیز نشان دادند که معمولاً ترکیب $dbh^2 \times h$ به‌عنوان متغیر ترکیبی بهتر برای تخمین زی‌توده در مقیاس برآوردی کلان می‌باشد (Brown *et al.,* 1989; Aboal *et al.,* 2005). نکته جالب‌توجه این است که اگرچه با افزایش ارتفاع به دقت مدل افزوده شده است، اما روند صعودی دقت آن بسیار ناچیز است (جدول ۲). درخصوص این موضوع می‌توان به تحقیقات مختلف از جمله Ketterings و همکاران (۲۰۰۱) و Ribeiro و همکاران (۲۰۱۱) اشاره کرد که بیان داشتند علاوه‌براین‌که اندازه‌گیری ارتفاع نسبت به قطر برابرسینه سخت‌تر و از دقت کمتری برخوردار است، در معادلات آلومتریک نیز همبستگی کمتری با زی‌توده دارد و اگرچه تاحدی باعث بهبود مدل‌ها می‌شود، اما تأثیرات آن بسیار ناچیز است. همچنین نتایج نشان داد که افزایش سن نیز در ترکیب‌های مختلف نتیجه معکوس داشته و اصلاً باعث بهبود مدل‌های ارائه‌شده نشده است (جدول ۲)، بنابراین به‌راحتی می‌توان دریافت که متغیرهایی مثل سن که دارای همبستگی خیلی زیادی با قطر برابرسینه هستند، در مدل‌های خطی لگاریتمی به‌عنوان یک جزء از متغیر ترکیبی جایگاهی به‌منظور بهبود دقت مدل‌های آلومتری زی‌توده تنه ممرز در منطقه موردمطالعه ندارند. البته برخلاف نتایج به‌دست‌آمده مربوط به این تحقیق، Joosten و همکاران (۲۰۰۴) در مطالعاتی با مقیاس وسیع در غرب آلمان در چهار رویشگاه مختلف و درکل درمورد ۱۱۶ درخت راش نتیجه گرفتند که ارتفاع و سن درخت در قبال اضافه‌شدن به قطر برابرسینه در معادلات آلومتریک اطلاعات قابل‌توجهی را ارائه می‌دهند. البته این امر می‌تواند به سه دلیل باشد (گذشته از اینکه نوع گونه مطالعاتی متفاوت است و بعضاً نرخ سنی رشد و چگالی چوب دارای تفاوت حائز اهمیت می‌باشد): اول اینکه تعداد نمونه‌ها در مطالعه ایشان نسبت به تحقیق پیش‌رو خیلی بیشتر است. دوم اینکه آنها در مشاهداتشان طبقه‌های قطری پایین را نیز درنظر گرفتند که در طبقه‌های قطری پایین‌تر بین قطر و ارتفاع همبستگی شدیدتری وجود دارد. درصورتی‌که در تحقیق پیش‌رو حداقل طبقه قطری ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر بود که از این طبقه به بالا روند تغییرات ارتفاع تنه درختانی چون ممرز خیلی کمتر می‌باشد. سومین دلیل به‌عنوان مهمترین دلیل به‌ویژه در رابطه با تأثیرگذاری سن درختان راش موردمطالعه در بهبود دقت مدل‌ها می‌تواند به این خاطر باشد که ایشان از مدل‌های لگاریتمی خطی چندمتغیره استفاده کردند که هر

یک از متغیرهای قطر، ارتفاع و سن به‌عنوان متغیر مستقل محسوب می‌شوند. در تحقیق پیش‌رو ارائه مدل‌های خطی چندمتغیره امکان‌پذیر نبود، زیرا براساس آزمون هم‌خطی چندگانه (Multicollinearity diagnostic test) شاخص تورم واریانس مقداری غیرقابل‌قبول برای مدل‌های مذکور ارائه داد (Variance inflation factor/ VIF > 10) که نشان می‌دهد در مدل‌های مربوطه هم‌خطی چندگانه وجود دارد و مدل‌ها دارای عدم اعتبار محاسباتی هستند (Bihamta & Zare Chahouki, 2011). بنابراین در بخش نتایج از ارائه این نوع مدل‌ها خودداری شد. البته باید خاطرنشان کرد که در اکثر مطالعات مربوط به معادلات آلومتریک، سه متغیر قطر برابرسینه، ارتفاع و چگالی خشک به‌عنوان متغیرهای اصلی درنظر گرفته می‌شوند، اما این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که تعداد نمونه‌های موردنظر باید به‌مراتب زیادتر بوده و اطلاعات مربوط به چند رویشگاه و یا چند گونه با جرم حجمی متفاوت در دسترس باشد (Djomo *et al*., 2010).

نتایج این تحقیق نشان داد که مدل لگاریتمی تغییرشکل‌یافته (مدل لگاریتمی مبتنی بر متغیرهای ترکیبی) و مدل نمایی می‌توانند در محاسبه وزن خشک تنه ممرز مکمل یکدیگر قرار گیرند. ازآنجاکه مدل ارجح در این تحقیق مدل لگاریتمی خطی برحسب مربع قطر برابرسینه و ارتفاع تنه معرفی شد، ازاین‌رو مدل آلومتری معرفی‌شده در تحقیق پیش‌رو $Y = Exp[۱/۱۱ \times [۱/۰۰۷ \ln(dbh^2 \times h) - ۳/۴۷]$ معرفی می‌شود. البته باید متذکر بود که اگرچه ورود متغیر ارتفاع در معادلات آلومتریک بیانگر تغییرات خیلی زیاد در رویشگاه مربوطه نیست، اما مزیت اضافه‌شدن آن در معادلات آلومتریک علاوه‌بر قطر برابرسینه اینست که معادلات به‌دست‌آمده قابلیت استفاده‌شدن در رویشگاه‌های مشابه را هم دارند (Aboal *et a*l., 2005). البته با توجه به اینکه شرط استفاده از این نوع معادلات در کلیه رویشگاه‌ها به‌ترتیب در سطح محلی، منطقه‌ای و جهانی انطباق درجه حرارت یا ناحیه کلیماتیکی (Climatic zone) و میزان بارندگی می‌باشد (Chave *et al*., 2005; Alvarez *et al*., 2012)، بنابراین معادلات معرفی‌شده درصورت تطبیق با شرایط مذکور، قابل کاربرد در رویشگاه‌های دیگر می‌باشد، به‌خصوص زمانی‌که شرایط حفاظتی در منطقه وجود دارد و نمونه‌برداری تخریبی و اندازه‌گیری مستقیم نیز امکان‌پذیر نیست.

سپاسگزاری

این تحقیق با همکاری پرسنل محترم اداره نظارت طرح رویان انجام شده است که در این راستا از کلیه عزیزان برای همکاری و انجام نمونه‌برداری صحرایی تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از کلیه پیمانکاران و کارگران محترم قطع و استحصال چوب در منطقه موردمطالعه به‌منظور ساماندهی فیزیکی عملیات نمونه‌برداری و توزین سپاسگزاری می‌شود.

References

- Aboal, R.J., Arevalo, R.J. and Fernandez, A. 2005. Allometric relationships of different tree species and stand above ground biomass in the Gomera laurel forest (Canary Islands). Flora, 200: 264-274.
- 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. Forestry Project of the Third District of Glandrood-Noor (Second Renewal View). Published by Administration of Natural Resources at Nowshahr (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.
- Bihamta, M.R. and Zare Chahouki, M.A. 2011. Principle of Statistic for the Natural Resources Science. University of Tehran Press, 300p (In Persian).
- Brown S., Gillespie A. and Lugo A.E. 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. Forest Science, 35:881-902

- Brown, S. and Lugo, A.E. 1982. The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in global carbon cycle. Biotropica, 14: 161-18.
- Chave, J., Andalo, C., 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.
- Fehrmann, L. and Kleinn, C. 2006. General considerations about the use of allometric equations for biomass estimation on the example of Norway spruce in central Europe. Forest Ecology and Management, 236: 412-421.
-Han, B., Wang, X.K. and Ouyang, Z.Y. 2005. Saturation levels and carbon sequestration potentials of soil carbon pools in farmland ecosystems of China. Rural Eco-Environment, 21(4): 6-11.
- Henry, M., Besnard, A., Asante, W.A., Eshun, J., Adu-Bredu, S., Valentini, R., Bernoux, M. and Saint-André, 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.
- Houghton, R.A., Hall, F. and Goetz, S.J. 2009. Importance of biomass in the global carbon cycle. Journal of Geophysical Research, 114: 13p.
- Joosten, R., Schumacher, J., Wirth, C. and Schulte, A. 2004. Evaluating tree carbon predictions for beech (*Fagus sylvatica* L.) in western Germany. Forest Ecology and Management, 189: 87- 96.
- 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.
- Li, X.Y. and Tang, H.P. 2006. Carbon sequestration: manners suitable for carbon trade in China and function of terrestrial vegetation. Journal of Plant Ecology, 32: 200-209.
- Marvie Mohadjer, M.R. 2005. Silviculture. University of Tehran Press, Tehran, 387p (In Persian).
- 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).
- Navar, J. 2009. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. Forest Ecology and Management, 257: 427-434.
- Peichl, M. and Arain, M.A. 2006. Above- and belowground ecosystem biomass and carbon pools in an age-sequence of temperate pine plantation forests. Agricultural and Forest Meteorology, 140: 51-63.
- Ribeiro, S., 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.
- Segura, M. and Kanninen, M. 2005. Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. Biotropica, 37: 2-8.
- Singh, V., Tewari, A., Kushwaha, S.P.S. and Dadhwal, V.K. 2011. Formulating allometric equations for estimating biomass and carbon stock in small diameter trees. Forest Ecology and Management, 261:1945-1949.
- Sohrabi, H. and Shirvani, A. 2012. Allometric equations for estimating standing biomass of Atlantic Pistache (*Pistacia atlantica* var. *mutica*) in Khojir National Park. Iranian Journal of Forest, 4(1): 55-64 (In Persian).
- Turski, M., Beker, C., Kazmierczak, K. and Najgrakowski, T. 2008. Allometric equations for estimating the mass and volume of fresh assimilation apparatus of standing scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees. Forest Ecology and Management, 255: 2678-2687.
- Vallet, P., Dhôte, J.F., Moguédec, G.L., Ravart, M. and Pignard, G. 2006. Development of total aboveground volume equations for seven

important forest tree species in France. Forest Ecology and Management, 229: 98-110.
- Vann, D.R., Palmiotto, P.A. and Richard, S. 1998. Allometric equations for two South American conifers: Test of a non-destructive method. Forest Ecology and Management, 106: 55-71
- 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. Carbon Cycle Process in East Asia, 123:439-452.
- Zianis, D. and Mencuccini, M. 2004. Onsimplifying allometric analyses of forest biomass. Forest Ecology and Management, 187: 311-332.

Optimal allometric biomass equations for Hornbeam (*Carpinus betulus* L.) boles within the Hyrcanian forests

A.A. Vahedi *

* Corresponding author, Ph.D. Forestry, Department of Forest Ecology and Silviculture, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, I.R. Iran. E-mail: ali.vahedi60@gmail.com

Received: 09.05.2013 Accepted: 12.29.2013

Abstract

According to the amount of carbon emitted to the atmosphere, obtaining accurate estimations of biomass is an effective step to deal with the global warming and climate change on various spatial scales. Therefore, this study pursued the aim of investigating allometric models to increase the accuracy of the dry biomass calculation for hornbeam (*Carpinus betulus* L.), which is one of the most abundant tree species across the Hyrcanian forests of Iran. The diameter at breast height, bole height and age were used as explanatory variables in non-linear models (power and exponential functions) and as combined variables in linear, log-transformed models. The results showed that the power and exponential functions of diameter returned the best fit and highest accuracy (R^2adj= 0.72-0.75; SEE = 0.53-0.51). For the entire combined variables, the squares diameter and height ($dbh^2 \times h$) was the best combination, showing the highest correlation with the observations. Subsequently, the log-transformed model containing the mentioned combined variables returned the highest estimation accuracy (R^2adj= 0.77; SEE = 0.48) and best fit-goodness. Regarding the acquired variance inflation factor (VIF >10), the multiple linear models were not significant. Furthermore, the least correction factor was calculated (CF = 1.11) to correct for the model bias. Therefore, the optimal model of $Y = Exp [-3.47 + 1.007 \ln(dbh^2 \times h)$ was introduced to estimate bole biomass of hornbeam .

Key words: Global warming, bole biomass, fit-goodness, hornbeam, allometric model.