

بررسی امکان برآورد ترسیب کربن تنه درختان راش شرقی (*Fagus orientalis* L.) در جنگل‌های هیرکانی با استفاده از روش‌های غیر تخریبی

علی اصغر واحدی^{۱*} و اسداله متاجی^۲

^۱ دکتری جنگلداری، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران
^۲ دانشیار گروه جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۴/۱)

چکیده

با توجه به اینکه درختان در اکوسیستم‌های جنگلی، مخازن بزرگ کربن در زمینه کاهش انتشار کربن اتمسفری به‌شمار می‌روند، چگونگی برآورد موجودی ذخایر کربن آنها مهم‌ترین موضوع‌های پژوهشی محققان اکولوژی است. با توجه به سهم تنه در حداکثر وزن درختان، تحقیق حاضر در پی این است که آیا استفاده از روش‌های غیر تخریبی برای برآورد مقادیر ترسیب کربن تنه درختان راش شرقی جنگل‌های هیرکانی، معرف مناسبی است یا خیر. در این تحقیق ضریب کربن تبدیلی با استفاده از روش احتراق به‌طور مستقیم محاسبه شد. با دسترسی به مشاهدات مربوط به اوزان خشک و چگالی تنه گونه مذکور در جنگل بررسی شده، از رابطه حجم و چگالی خشک تنه و مدل‌های معرفی شده‌ی توده گونه‌های مختلف درختان راش (*Fagus* spp.) در بیوم‌های مختلف به‌عنوان روش‌های غیر تخریبی برآورد زی توده تنه درختان راش شرقی استفاده شد. کربن تبدیلی تنه درختان تحقیق حاضر در حدود ۵۷ درصد معرفی شد. نتایج تحقیق حاضر براساس حداقل میانگین باقی مانده‌ها و معنی دار نبودن مقدار t جفتی بین تخمین حاصل از هر مدل آلومتریک و مقادیر واقعی زی توده (مشاهدات) نشان داده شد. بر این اساس، مدل آلومتریک $Y = \exp [2/53 \ln(d) - 3/03]$ مربوط به درختان راش غربی (*F. sylvatica*) رویشگاه‌های غرب آلمان و رابطه آلومتریک حجم و چگالی خشک $(Y = 0.239 (D^2 \times H))$ در تحقیق حاضر با توجه به ضریب کربن محاسباتی به-دست آمده، به ترتیب برای تخمین ترسیب کربن درختان راش شرقی در جنگل‌های هیرکانی دقیق‌ترند.

واژه‌های کلیدی: چرخه کربن، راش شرقی، روش‌های غیر تخریبی، زی توده، معادلات آلومتریک.

مقدمه و هدف

درختان جنگل، از مهم‌ترین و بزرگ‌ترین مخازن کربن در اکوسیستم‌های جنگلی به‌شمار می‌روند و تأثیر بسیار زیادی در کاهش انتشار کربن اتمسفری دارند. از این رو، چگونگی اندازه‌گیری و برآورد موجودی ذخایر کربن درختان در اکوسیستم‌های جنگلی از مهم‌ترین دلمشغولی‌های اکولوژیست‌هاست. تعیین هرچه دقیق‌تر زی‌توده درختان جنگل علاوه‌بر اینکه در مدیریت پایدار منابع طبیعی بسیار اهمیت دارد، سهم جنگل را نیز در چرخه جهانی کربن مشخص می‌کند (Zianis and Mencuccini, 2003). اگرچه یک درخت دارای اجزاء مختلف از جمله ریشه، کنده، تنه، تاج و شاخ و برگ است، بیشتر وزن درخت (حدود ۸۰ درصد) به تنه متعلق است (Zianis and Mencuccini, 2004). از این رو مطالعه و تعیین زی‌توده تنه درختان از مهم‌ترین موضوع‌های پژوهشی برای مدیریت هر چه بهتر جنگل و بررسی انتشار کربن اتمسفری قلمداد می‌شود (Navar, 2009). استفاده از روش تخریبی یعنی قطع و وزن کردن درختان در عرصه مطالعاتی، از دقیق‌ترین روش‌های اندازه‌گیری زی‌توده هوایی درختان به‌منظور برآورد هرچه دقیق‌تر ترسیب کربن درختان محسوب می‌شود (واحدی و همکاران، ۱۳۹۲؛ Ketterings *et al.*, 2001) ولی این روش بسیار مشکل و مستلزم صرف زمان طولانی و هزینه‌های هنگفت است و در بسیاری از موارد اجرا شدنی نیست. از این رو استفاده از روش‌های غیرتخریبی با حداکثر حدود اعتماد برآورد زی‌توده و بالطبع میزان ترسیب کربن درختان از بهترین و رایج‌ترین روش‌های کاربردی محسوب می‌شود (Vann *et al.*, 1998). روش‌های غیرتخریبی استاندارد با قابلیت زیاد و کاربرد وسیع شامل استفاده از معادلات آلومتریکی برای برآورد هر چه دقیق‌تر زی‌توده (وزن خشک) درختان است که از آن میان، می‌توان به رابطه آلومتریکی حجم و چگالی خشک و مدل‌های مختلف

آلومتریکی مربوط به درختان یک جنس یا گونه‌ای خاص در رویشگاه‌ها و بیوم‌های مختلف اشاره کرد (Ketterings *et al.*, 2001; Peichl and Arain, 2006;) (Kirby and Potvin, 2007; Ribeiro *et al.*, 2011). در تحقیق حاضر نیز تنه درختان گونه راش (*Fagus orientalis* Lipsky) برای برآورد غیرتخریبی زی‌توده بررسی شد. شایان ذکر است که تعیین هرچه دقیق‌تر زی‌توده تنه درختان راش با توجه به اینکه راش، یکی از گونه‌های مهم اکولوژیک و اقتصادی جنگل‌های هیرکانی به‌شمار می‌رود، عامل بسیار مهمی در زمینه مدیریت جنگل‌های راش و محاسبه دقیق سهم گونه مذکور در زمینه مقدار ترسیب کربن در سطح محلی، منطقه‌ای و حتی ملی است. در این زمینه، واحدی و همکاران (۱۳۹۲) به‌منظور مدلسازی معادلات آلومتریکی، برای اندازه‌گیری و محاسبه زی‌توده تنه درختان راش جنگل‌های هیرکانی در مطالعه موردی جنگل گلندرود نور، از روش تخریبی و توزین استفاده کردند. از این رو، با توجه به اینکه برآورد زی‌توده تنه درختان راش در مطالعه واحدی و همکاران (۱۳۹۲) دارای حداقل عدم قطعیت (SEE = ۰/۰۷۲۳) است و می‌تواند معیار مناسبی برای سنجش دقت استفاده از روش‌های غیرتخریبی محسوب شود، مطالعه حاضر نیز در جنگل گلندرود نور صورت گرفت تا با استفاده از مشاهدات مستقیم مربوط به اوزان خشک تنه در مطالعه آنان مشخص شود که آیا روش‌های غیرتخریبی برآورد زی‌توده تنه درختان راش می‌تواند جایگزین مناسبی برای تخمین میزان ترسیب کربن تنه درختان گونه مذکور در جنگل‌های شمال باشد. در این راستا می‌توان به تحقیقات Zianis and Mencuccini (2005)، Kirby and Potvin (2007)، Ribeiro *et al.* (2011) و Djomo *et al.* (2010) اشاره کرد که برای توسعه مدلسازی آلومتریکی و مقایسه برآورد زی‌توده هوایی و ترسیب کربن درختان به‌روش تخریبی و غیرتخریبی از داده‌ها و مشاهدات حاصل از نتایج مستقیم (مشاهدات) دیگر مطالعات در

همان رویشگاهها استفاده کردند.

درجه سانتی‌گراد و در بهمن ۳/۹ درجه سانتی‌گراد است. متوسط بارندگی سالیانه ۱۲۹۳/۵ میلی‌متر است که میانگین حداقل بارندگی در مرداد و میانگین حداکثر بارندگی در اواخر آبان تا اوایل آذر گزارش شده است (واحدی و همکاران، ۱۳۹۲).

روش تحقیق

در تحقیق حاضر برای دریافت مشاهدات مربوط به زی‌توده و جرم حجمی خشک تنه‌های قطع شده از مشاهدات (برای ۲۱ پایه قطع شده درباره مقادیر واقعی زی‌توده تنه درختان راش) پژوهش واحدی و همکاران (۱۳۹۲) استفاده شد. در تحقیق حاضر، برای تعیین ترسیب کربن زی‌توده تنه درختان راش ضریب کربن [C] به روش احتراق محاسبه شد. به این صورت که پس از تعیین مقدار مشخص و مساوی از نمونه‌های چوبی تکه برداری شده از تنه، نمونه‌ها توزین شده و در کوره حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به خاکستر تبدیل شدند. خاکسترها دوباره توزین شدند. با در دست داشتن وزن اولیه و وزن خاکسترهای ایجاد شده و نسبت کربن آلی به ماده آلی در نهایت درصد کربن محاسباتی یا همان ضریب کربن [C] برای هر نمونه چوبی حاصل شد (بردبار و همکاران، ۱۳۸۵).

تجزیه و تحلیل آماری

به منظور استفاده از روش تخریبی برای برآورد زی‌توده تنه درختان راش شرقی، ابتدا از معادلات آلومتریک در سطح جهانی مربوط به درختان راش (*Fagus spp.*) در بیوم‌های مختلف استفاده شد. معادلات انتخاب شده، بیشتر مربوط به درختان راش جنگل‌های شمال آمریکا، جنگل‌های اروپای مرکزی و اروپای غربی است. برای این منظور از مدل‌های ارجح اعم از مدل توانی و مدل لگاریتمی خطی تک‌متغیره یا چندمتغیره برای برآورد زی‌توده مدنظر استفاده شد. معادلات آلومتریک تحقیق حاضر، همان مدل‌های

با توجه به شرایط راشستانهای جنگل‌های هیرکانی که اغلب شرایط توپوگرافی به نسبت سخت دارند و با توجه به محدودیت قطع و نمونه برداری‌های تخریبی توسط سازمان‌های اجرایی، اولویت بر استفاده از روش‌های غیر تخریبی برای برآورد زی‌توده اجزای درختان است. هدف اصلی این تحقیق نیز اشاعه استفاده از روش‌های غیر تخریبی به جای روش‌های مشکل تخریبی برای تخمین زی‌توده هوایی (به خصوص تنه درختان) با دقت بیشتر است تا از این طریق بتوان راحت‌تر و بدون صرف هزینه و زمان طولانی، برآورد واقعی درباره مقادیر ترسیب کربن تنه گونه تحت مطالعه در جنگل‌های هیرکانی داشت.

مواد و روش‌ها

منطقه تحقیق

این تحقیق در سری ۳ جنگل‌های گلندرود نور واقع در حوضه آبخیز ۴۸ جنگل‌های شمال ایران صورت گرفته است.

مساحت کل سری ۱۵۲۱ هکتار است و محدوده این سری معروف به سری ۳ سرگلند در بین عرض جغرافیایی ۳۶ درجه، ۲۷ دقیقه، ۳۰ ثانیه و ۳۶ درجه، ۳۲ دقیقه، ۱۵ ثانیه و طول جغرافیایی ۵۱ درجه، ۵۳ دقیقه، ۲۵ ثانیه و ۵۱ درجه، ۵۷ دقیقه، ۲۵ ثانیه قرار دارد. محدوده ارتفاع از سطح دریا در این سری بین ۹۴۰ تا ۱۵۲۰ متر است که گونه راش به صورت آمیخته با بلوط، ممرز، پلت و نم‌دار پراکنش دارد. محدوده مطالعاتی برای برآورد غیر تخریبی زی‌توده تنه درختان راش مربوط به پارسل‌های ۲ و ۴ این سری است. در هر دو پارسل مذکور، عملیات قطع با دستگاه‌های اجرایی و نمونه برداری تخریبی توسط واحدی و همکاران (۱۳۹۲) صورت گرفت. آمار دریافتی مربوط به ایستگاه هواشناسی نوشهر طی ۳۰ سال گذشته نشان داد که میانگین بیشینه و کمینه دما به ترتیب در اواسط مرداد تا اواخر شهریور ۲۸/۸

و در جدول ۲ مدل‌های تبدیلی مدل توانی به رگرسیون لگاریتمی - خطی برای برآورد زی توده درختان راش در بیوم‌های مختلف معرفی شده است (با توجه به کدهای مذکور در جدول‌های زیر، نتایج تخمین هر یک از مدل‌ها در بخش نتایج بر اساس معادلات هر یک از کدها ارائه شده است).

برآورد زی توده درختان راش (*Fagus spp.*) در راشستان‌های بیوم‌های مختلف است که در این زمینه از منابع مختلف استفاده شده است (جدول‌های ۱ و ۲). در جدول‌های ۱ و ۲ ضرایب و شاخص‌های اعتبارسنجی کلیه مدل‌های آلمتریک به کار رفته در پژوهش نشان داده شده است. در جدول ۱ مدل توانی

جدول ۱- مدل‌های توانی زی توده درختان راش مربوط به مطالعات مختلف

کد	گونه	منابع	a	b	R ² _{adj}	N	منطقه تحقیق
۱	<i>F. grandifolia</i> Ehrh.	Ter-Mikaelian and Korzukhin, 1997	۰/۲۰۱	۲/۲۹۸	۰/۹۹	۲۹	ماین ^۱ در شمال ایالات متحده
۲	<i>F. grandifolia</i> Ehrh.	Ter-Mikaelian and Korzukhin, 1997	۰/۱۹۵	۲/۲۵۳	۰/۹۹	۴۶	نیوبرانسویک ^۲ در شمال ایالات متحده
۳	<i>F. grandifolia</i> Ehrh.	Ter-Mikaelian and Korzukhin, 1997	۰/۱۹۵	۲/۳۹۱	۰/۹۹	۱۴	نیوهامپشیر ^۳ در شمال ایالات متحده
۴	<i>F. grandifolia</i> Ehrh.	Ter-Mikaelian and Korzukhin, 1997	۰/۰۸۴۲	۲/۵۷۱	۰/۹۷	۵۶	غرب ویرجینیا ^۴ در ایالات متحده
۵	<i>F. sylvatica</i> L.	Baterlink, 1997	۰/۰۷۹۸	۲/۶۰۱	۰/۹۹	۳۲	اروپا، مرکز هلند
۶	<i>F. sylvatica</i> L.	Santa Regina, 2001	۰/۱۳۲	۲/۴۳۲	۰/۹۹	۷	اروپا، شمال اسپانیا
۷	<i>F. moesiaca</i> Cz.	Zianis and Mencuccini, 2003	۰/۲۵۱	۲/۳۴۸	۰/۹۹	۱۶	اروپا، شمال یونان
۸	<i>F. sylvatica</i> L.	Pretzsch, 2000	۰/۱۱	۲/۵۰	-	۴۹	اروپا، گوتینگن، آلمان
۹	<i>F. moesiaca</i> Cz.	Wutzler et al., 2008	۰/۰۲۹۳	۰/۹۷۴	-	۲۰	اروپای مرکزی

a: ضریب ثابت، b: توان مدل، R²_{adj}: ضریب تبیین تعدیل یافته، N: تعداد مشاهدات (درختان قطع شده)

جدول ۲- مدل‌های لگاریتمی خطی زی توده تنه درختان راش در مطالعات مختلف

کد	گونه	منابع	a	b	c	R ² _{adj}	N	منطقه تحقیق
۱۰	<i>F. moesiaca</i> Cz.	Zianis and Mencuccini, 2003	-۱/۶۰	۲/۳۴	-	۰/۹۸	۱۶	اروپا، شمال یونان
۱۱	<i>F. sylvatica</i> L.	Joosten et al., 2004	-۳/۰۳	۲/۵۳	-	۰/۹۹	۱۱۶	اروپا، غرب آلمان
۱۲	<i>F. sylvatica</i> L.	Joosten et al., 2004	-۳/۷۳	۲/۱۵	۰/۶۳	۰/۹۹	۱۱۶	اروپا، غرب آلمان
۱۳	<i>F. sylvatica</i> L.	Joosten et al., 2004	-۲/۸۷	۲/۰۹	۰/۶۷	-	۴۲	اروپا، وین، اتریش
۱۴	<i>F. orientalis</i> L.	واحدی و همکاران (۱۳۹۲)	-۳/۴۳	۰/۹۷۷	-	۰/۹۹	۲۱	خاورمیانه، شمال ایران

a: ضریب ثابت؛ b و c: ضرایب متغیر، R²_{adj}: ضریب تبیین تعدیل یافته، N: تعداد مشاهدات (درختان قطع شده)، SEE: اشتباه معیار تخمین

¹ Maine, USA

² New Brunswick, USA

³ New Hampshire, USA

⁴ West Virginia

Y_{pi} : زی توده برآوردی و Y_i : زی توده واقعی (مشاهدات) است.

نتایج

جدول ۳ نتایج تجزیه واریانس یکطرفه چگالی خشک و ضریب کربن تبدیلی تنه درختان راش را بین کلیه پایه‌ها نشان می‌دهد. مطابق جدول مذکور نتایج نشان داد که جرم حجمی به دست آمده بین پایه‌های مختلف دارای اختلاف معنی‌داری نیست ($P > 0.05$). از طرفی، نتایج آزمون توکی درباره مقایسه چندگانه میانگین‌ها نشان داد که بین کلیه مقادیر میانگین چگالی کلیه پایه‌های مطالعه شده، اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. از این‌رو، متوسط (\pm اشتباه معیار) چگالی خشک تنه چوب در تحقیق حاضر ($WD = 0.60 \pm 0.002$) بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب به دست آمد. از طرفی نتایج نشان داد که درصد کربن محاسباتی بین کلیه پایه‌های مختلف دارای تغییرات معنی‌دار نیست (جدول ۱). از این‌رو با استناد به نتایج آزمون توکی در زمینه نبود اختلاف معنی‌دار بین کلیه مقادیر میانگین متغیر مزبور، متوسط (\pm اشتباه معیار) ضریب کربن تبدیلی زی توده تنه درختان راش در منطقه تحقیق ($[C] = 0.06 \pm 0.95/56$) بر حسب درصد حاصل شد.

جدول ۴ ارتباط بین مشاهدات و حجم تنه راش را به صورت رگرسیون لگاریتمی - خطی نشان می‌دهد. در رگرسیون ارائه شده در جدول ۴، $\ln Y$: لگاریتم طبیعی زی توده تنه درختان راش بر حسب کیلوگرم و V : حجم تنه راش بر حسب متر مکعب در منطقه تحقیق است.

نتایج مذکور نشان داد که بین حجم و زی توده تنه درختان راش در منطقه تحقیق همبستگی صعودی وجود دارد؛ یعنی همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، بین لگاریتم حجم و لگاریتم زی توده رابطه خطی با حداکثر برازش وجود دارد ($SEE = 0.07$).

برای محاسبات تعیین زی توده تنه درختان گونه بررسی شده از رابطه ۱ استفاده شد (Peichl and Arain, 2006; Kirby and Potvin, 2007):

$$\langle AGB \rangle_{bole} = \pi dbh^2 / 4 \times h \times f \times WD \quad \text{رابطه ۱}$$

$$\langle AGB \rangle_{bole} = V \times WD$$

در این رابطه $\langle AGB \rangle_{bole}$: زی توده تنه (کیلوگرم)، dbh : قطر برابر سینه (سانتی‌متر)، h : ارتفاع تنه (متر)، f : ضریب شکل، WD : چگالی خشک چوب (کیلوگرم در متر مکعب) و V : حجم تنه (متر مکعب) است. در بیشتر تحقیقات درباره ضریب شکل درختان در مورد جنگل‌های طبیعی شمال ایران یا خارج از آن، ضریب شکل را به‌طور میانگین ۰/۵ در نظر می‌گیرند (نمیرانیان، ۱۳۸۵؛ Peichl and Arain, 2006). برای تعیین چگالی چوب از رابطه ۲ استفاده شد (۸):

$$WD = M/V \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه M : وزن خشک نمونه چوب مورد نظر (گرم)، V : حجم تر نمونه چوب مورد نظر (سانتی‌متر مکعب) و WD : چگالی خشک چوب (گرم بر سانتی‌متر مکعب) است.

برای تعیین دقت برآوردی زی توده تنه گونه راش به روش غیر تخریبی از آزمون t جفتی بین نتایج مربوط به تخمین هر یک از معادلات آلومتریکی و مشاهدات زی توده تنه درختان راش استفاده شد (رضایی، ۱۳۹۰؛ Ajit et al., 2011). در نهایت مقدار t جفتی، میانگین باقی مانده‌ها و میانگین درصد انحراف معیار به ترتیب اولویت برای انتخاب مدل با بیشترین دقت تخمین استفاده شد (رضایی، ۱۳۹۰؛ Ajit et al., 2011). برای محاسبه درصد میانگین انحراف معیار از رابطه ۳ استفاده شد (Basuki et al., 2009).

$$S(\%) = \frac{100}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|y_{pi} - y_i|}{y_i} \quad \text{رابطه ۳}$$

در رابطه بالا، n : تعداد مشاهدات یا برآورد،

شکل ۱ می‌توان دریافت که حجم تنه یکی از متغیرهای محاسباتی مؤثر برای برآورد هرچه دقیق‌تر زی‌توده تنه درختان راش در منطقه تحقیق است.

$R^2_{adj} = 0/99$. با توجه به برازش نشان داده شده در

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس یکطرفه چگالی خشک تنه پایه‌های مختلف درختان راش

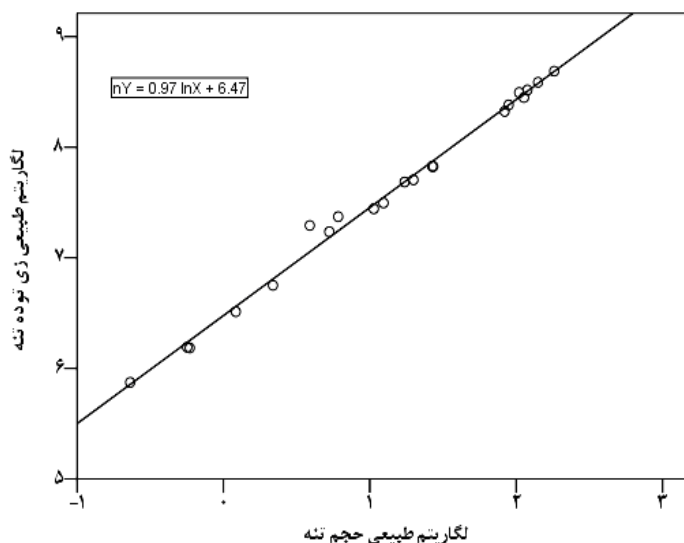
منبع تغییرات	F	سطح معنی داری
چگالی خشک	۱ / ۱۶۳	۰/۳۳۱ ^{NS}
ضریب کربن	۰/۳۱۷	۰/۹۹۶ ^{NS}

NS: عدم اختلاف معنی داری

جدول ۴- نتایج اعتبارسنجی رگرسیون زی‌توده تنه راش و حجم تنه در منطقه تحقیق

رگرسیون	a	b	R^2_{adj}	N	SEE	CF
$\ln Y = a + b \ln(V)$	۶/۴۷	۰/۹۷۷	۰/۹۹۳	۲۱	۰/۰۷۳	۱/۰۰۲

a: ضریب ثابت، b: ضریب متغیر، R^2_{adj} : ضریب تبیین تعدیل یافته، N: تعداد مشاهدات، SEE: اشتباه معیار تخمین، CF: ضریب تصحیح



شکل ۱- ابر نقاط و منحنی برازش یافته مدل لگاریتمی - خطی برای تعیین زی‌توده خشک تنه راش با استفاده از حجم تنه

رابطه ۴ $Y = \Pi/4 (d^2 \times h) \times f(0.5) \times$ (kg)

$$10^{-4} \times 0.61 \times (10^{-3} / 10^{-6}) = 0.0239 \times (d^2 \times h)$$

با توجه به اینکه واحدهای اندازه‌گیری قطر

با احتساب نتایج محاسبات چگالی خشک تنه درختان راش، برای تعیین معادله آلومتریک برآوردی در تحقیق حاضر با توجه به رابطه ۱، مقدار زی‌توده تنه راش به صورت رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

برآورد زی‌توده تنه درختان راش در بیوم‌های مختلف‌اند. براساس جدول ۵ نتایج نشان داد که تخمین‌های حاصل از مدل لگاریتمی - خطی حاوی متغیر ترکیبی مربع قطر برابرسینه و ارتفاع (مدل ۱۴) مربوط به راش شرقی در جنگل‌های هیرکانی و مدل لگاریتمی - خطی حاوی تنه متغیر قطر برابرسینه (مدل ۱۱) مربوط به راش غربی در رویشگاه‌های غرب آلمان نسبت به مقادیر مختلف مشاهدات وزن خشک تنه درختان راش در منطقه تحقیق، اختلاف معنی‌داری ندارند ($p > 0.05$). علاوه بر آن نتایج نشان داد که تخمین معادله آلومتریک حاصل از تحقیق حاضر ($Y = 0.0239 (D^2 \times H)$)، نسبت به مشاهدات دارای میانگین درصد انحراف معیار کمتری ($S\% = 11/21$) نسبت به بقیه معادلات آلومتریک مربوط به بیوم‌های مختلف برخوردار است، ولی مقدار t جفتی بین تخمین معادله مذکور و مشاهدات معنی‌دار است ($p < 0.05$).

برابرسینه (سانتی‌متر) و ارتفاع (متر) متفاوت بوده و جرم حجمی محاسبه‌شده نیز بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب است، از محاسبات تبدیلی برای به‌دست آوردن زی‌توده تنه بر حسب کیلوگرم استفاده شد. با توجه به رابطه ۴ معادله آلومتریک به‌دست آمده برای برآورد زی‌توده تنه راش $Y = 0.0239 (D^2 \times H)$ معرفی شد. در رابطه مذکور d : قطر برابرسینه بر حسب سانتی‌متر، h : ارتفاع تنه بر حسب متر، Y وزن خشک تنه بر حسب کیلوگرم است. از این‌رو رابطه ۵ برای برآورد مستقیم ترسیب کربن تنه درختان راش در منطقه تحقیق معرفی شد.

$$Y = 0.0239 (D^2 \times H) \times 0.57 \quad \text{رابطه ۵}$$

جدول ۵ نتایج آزمون t جفتی بین مشاهدات و تخمین هر یک از مدل‌های آلومتریک بهینه را که در جنگل‌های مختلف راش در نقاط مختلف جهان مورد معرفی شده‌اند به‌طور خلاصه نشان می‌دهد. شایان ذکر است که معادلات مذکور در جدول ۵ مختص

جدول ۵- نتایج اعتبارسنجی مدل‌های استفاده‌شده برای برآورد زی‌توده تنه راش

کد	معادله آلومتریک	میانگین باقی‌مانده‌ها	اشتباه معیار میانگین	آماره t	S%
۱	$Y = 0.0201 d^{2.298}$	-۱۵۶۹/۵۲	۲۴۲/۴۷	-۶/۴۷	۷۰/۲۶
۲	$Y = 0.0195 d^{2.253}$	-۶۹۶/۳۱	۱۳۱/۹	-۵/۲۷	۳۹/۳۴
۳	$Y = 0.0195 d^{2.391}$	-۳۵۴۷/۹۵	۵۳۸/۶۵	-۶/۶۸	۱۴۱/۸۴
۴	$Y = 0.0842 d^{2.571}$	-۳۲۹۳/۹۱	۵۵۳/۳۲	-۵/۹۵	۱۲۴/۴۲
۵	$Y = 0.0798 d^{2.601}$	-۳۷۸۹/۵۲	۶۳۷/۵۶	-۵/۹۴	۱۴۱/۵۲
۶	$Y = 0.0132 d^{2.432}$	-۲۳۷۳/۴۱	۳۸۱/۷۸	-۶/۲۱	۹۵/۵۳
۷	$Y = 0.0251 d^{2.348}$	-۳۹۴۷/۳۷	۵۸۲/۰۲	-۶/۷۸	۱۶۰/۷۹
۸	$Y = 0.011 d^{2.50}$	-۳۰۱۶/۵۱	۴۹۲/۱۲	-۶/۱۲	۱۱۷/۰۸
۹	$Y = 0.0293 (d^2 h)^{0.974}$	۴۱۱/۸۳	۷۱/۴۵	۵/۷۶	۱۹/۸۲
۱۰	$Y = \exp [2/34 \ln(d) - 1/60]$	-۲۳۲۶/۸۲	۳۵۱/۵۷	-۶/۶۱	۹۷/۷۸
۱۱	$Y = \exp [2/53 \ln(d) - 3/03]$	-۱۷۱/۴۳	۱۱۱/۴۵	-۱/۵۳ ^{ns}	۱۹/۱۳
۱۲	$Y = \exp [-3/73 + 2/15 \ln(d) + 0/63 \ln(h)]$	۱۰۲۶/۶۴	۱۴۴/۳۱	۷/۱۱	۳۸/۰۵
۱۳	$Y = \exp [-2/87 + 2/09 \ln(d) + 0/67 \ln(h)]$	-۶۹۹/۳۷	۱۴۱/۶۳	-۴/۹۳	۳۰/۵۶
۱۴	$Y = \exp [-3/43 + 0/977 \ln(d^2 h)]$	۳۸/۰۵	۶۶/۵۷	۰/۵۷ ^{ns}	۸/۹۴
-	$Y = 0.0239 (D^2 \times H)$	۱۷۳/۳۶	۶۳/۵۱	۲/۵۷	۱۱/۲۱

t : مقدار t جفتی بین مشاهدات و مقادیر برآوردشده. ns : عدم معنی‌داری در سطح ۵ درصد، کلیه مقادیر در سطح ۱ درصد معنی‌دارند، S%: درصد میانگین انحراف معیار

بحث

نتایج مربوط به رابطه رگرسیون بین مشاهدات زی توده و حجم تنه درختان در تحقیق حاضر نشان داد که مدل توانی، مدل بهینه معرفی شده است. از این رو با توجه به ناهمگنی پراکنش داده‌ها برای تعیین برآزش منحنی مدل ذکر شده و تعیین شیب آن از تبدیل لگاریتمی مدل توانی با برآزش خطی استفاده شد (واحدی و همکاران، ۱۳۹۲؛ Djomo *et al.*, 2011). با توجه به اینکه برآزش صورت گرفته بین حجم و مقادیر واقعی زی توده تنه درختان راش صورت گرفت، جالب توجه بود که ضریب تعدیل یافته و اشتباه معیار تخمین رگرسیون مذکور و معادله آلومتریک بهینه درختان راش در مطالعه واحدی و همکاران (۱۳۹۲) در جنگل گلندرود مساوی است ($SEE = 0.073$ ؛ $R^2_{adj} = 0.993$). بنابراین، با توجه به شاخص‌های عنوان شده در نتایج این تحقیق، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که حجم محاسباتی تنه درختان راش، از مهم‌ترین کمیت‌های تأثیرگذار در برآورد دقیق زی توده تنه درختان راش در منطقه تحقیق محسوب می‌شود. از این رو از رابطه بین حجم و جرم حجمی خشک درختان راش ($Y=V \times WD$) برای برآورد زی توده تنه درختان استفاده شد. باید در نظر داشت که استفاده از میانگین جرم حجمی خشک در رابطه مذکور یا در کلیه معادلات آلومتریک به جای چگالی مطلق مربوط به هریک از پایه‌ها می‌تواند به ایجاد خطا در برآورد یا محاسبه زی توده منجر شود (Navar, 2009). نکته جالب توجه در این تحقیق این است که اختلاف معنی‌داری بین چگالی خشک چوب تنه درختان راش بین پایه‌های مختلف که بی‌گمان دارای دامنه قطری متفاوت و بالطبع حجم متفاوت‌اند، وجود ندارد ($P > 0.05$). بنابراین استفاده از میانگین چگالی خشک تنه چوب با توجه به مقدار ناچیز اشتباه معیار محاسبه شده ($SE = 0.02$) در تحقیق حاضر در رابطه مذکور، ممکن است سبب کاهش عدم قطعیت برآورد زی توده تنه درختان راش شود. در کل

نمی‌توان به میانگین چگالی مندرج در پایگاه‌های اطلاعاتی و یا منابع دیگر در دیگر رویشگاه‌ها در سطح منطقه‌ای یا حتی محلی اعتماد کرد، چرا که وقتی بین چگالی اندازه‌گیری شده و چگالی مندرج در منابع اختلاف جزئی نیز وجود داشته باشد، این امر به اختلاف و خطای فاحش در برآورد زی توده منجر می‌شود (Alvarez *et al.*, 2012). البته باید توجه داشت که مهم‌ترین دلایل اختلاف جرم حجمی چوب درختان از یک گونه و حتی گونه‌های مختلف در رویشگاه‌های مختلف ممکن است تغییرات مقدار بارندگی و درجه حرارت سالانه یا شرایط رویشگاهی از جمله عوامل ادافیکی و حتی ترکیب گونه‌ای در توده‌های گیاهی باشد (Ketterings *et al.*, 2001; Djomo *et al.*, 2010; Henry *et al.*, 2010).

در اکثر مطالعات، به‌طور معمول ضریب کربن محاسباتی برای برآورد مقادیر ترسیب کربن درختان را ۵۰ درصد در نظر می‌گیرند (MacDicken, 1997; Alvarez *et al.*, 2012; Zhu *et al.*, 2010). با توجه به اینکه مقادیر ضریب تبدیلی کربن، از مهم‌ترین عوامل محاسباتی و تخمینی مقدار ترسیب کربن زی توده درختان محسوب می‌شود، اندازه‌گیری ضریب کربن درختان به‌طور مستقیم سبب کاهش عدم قطعیت برآورد ذخایر کربن درختان می‌شود (Zhang *et al.*, 2009). از آنجا که ضریب کربن اندازه‌گیری شده در تحقیق حاضر بین پایه‌های مختلف دارای تغییرات معنی‌داری نیست در کلیه تخمین‌های زی توده حاصل از مدل‌های مختلف استفاده‌شده، ضریب مذکور، ضریب ثابت برای برآورد ترسیب کربن درختان راش محسوب می‌شود.

نتایج تحقیق حاضر نشان داد که رابطه بین حجم و چگالی خشک تنه درختان راش دارای حداقل درصد انحراف معیار ($S\% = 11/21$) نسبت به سایر مدل‌های استفاده‌شده است، ولی مقدار آماره t جفتی بین تخمین حاصل از این روش و مقادیر واقعی معنی‌دار شد که نشان می‌دهد رابطه آلومتریک مذکور نمی‌تواند

در جدول ۵ نیز کلیه نماهای مدل‌های توانی برحسب قطر برابرسینه دارای ارزش عددی بین ۲ و ۳ است. نکته حائز اهمیت در این زمینه، اعتبارسنجی مدل‌های معرفی شده می‌باشد. به همین دلیل برای تعیین دقت مدل‌های برآوردی در تحقیق حاضر، برازش بین مقادیر تخمینی (برآوردی) و مشاهدات از طریق شاخص‌هایی همچون میانگین درصد انحراف معیار و مقادیر آزمون t مدنظر قرار گرفت (رضایی، ۱۳۹۰؛ Ajit et al., 2011). همان‌طور که نتایج نشان داد، برحسب انتظار مدل ۱۴ حاصل از روش تخریبی و توزین که توسط واحدی و همکاران (۱۳۹۲) برای درختان راش شرقی در جنگل‌های هیرکانی ارائه شد، دارای آماره t نزدیک به صفر بود که به لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری نداشت. علاوه بر آن، در بین کلیه مدل‌های ارائه‌شده، معادله تک‌متغیره حاوی قطر برابرسینه (مدل ۱۱) مربوط به درختان راش غربی (*F. sylvatica*) متعلق به مطالعه Joosten et al. (2004) در رویشگاه‌های غرب آلمان نیز دارای میانگین باقی‌مانده‌ها و آماره t کمتری نسبت به بقیه مدل‌ها بود که از لحاظ اعتبارسنجی به‌عنوان مدل کاربردی برای تخمین زی‌توده تنه درختان راش شرقی می‌تواند استفاده شود. از این‌رو معرفی مدل‌های انتخاب‌شده می‌تواند یک معیار در زمینه مقایسه مقادیر زی‌توده و حتی شرایط رویشگاهی درختان راش و بالطبع نحوه مدیریتی جنگل‌های تحت مطالعه در تحقیق حاضر محسوب شود.

برپایه نتایج تحقیق حاضر می‌توان گزارش داد که گذشته از معادله آلومتریکی واحدی و همکاران (۱۳۹۲) که به‌طور مستقیم براساس روش تخریبی در جنگل تحت مطالعه تبیین شد، مدل ۱۱ و معادله آلومتریکی حاصل از رابطه حجم تنه و چگالی خشک تنه با احتساب ضریب کربن تبدیلی به‌دست‌آمده در تحقیق حاضر، به ترتیب برای تخمین ترسیب کربن درختان راش شرقی در جنگل‌های هیرکانی کاربرد دارند. استفاده از معادلات آلومتریکی در بیوم‌های مختلف برای درختانی همچون راش در جنگل‌های

معادله‌ای با حدود اطمینان زیاد برای محاسبه زی‌توده و ترسیب کربن تنه راش محسوب شود. درخصوص این موضوع باید در نظر داشت که مهم‌ترین عامل محاسباتی در زمینه محاسبه حجم تنه، تعیین ضریب شکل تنه تحت قالب فرم یا شکل ظاهری است که برای پایه‌هایی که دارای تنه‌های سیلندریک نیستند و در شرایط اکولوژیک یا رقابت، شکل ظاهری ویژه‌ای دارند، می‌تواند عاملی مؤثر برای خطا و کاهش دقت برآوردی زی‌توده تنه محسوب شوند.

نتایج برآورد زی‌توده تنه درختان راش در منطقه تحقیق با استفاده از معادلات آلومتریکی مربوط به درختان راش از گونه‌های متفاوت (*Fagus spp.*) در بیوم‌های مختلف، نشان داد که استفاده از این روش گاه ممکن است دارای دقت زیادی باشد و به‌عنوان روشی شایسته و قابل قبول برای برآورد زی‌توده تنه راش در منطقه تحقیق محسوب شود. درباره تشریح ساختار این مدل‌ها طبق نتایج به‌دست‌آمده توسط مطالعات مختلف در بیوم‌های متفاوت مدل توانی به‌عنوان برترین مدل با بیشترین دقت برای تخمین زی‌توده درختان به‌کار گرفته می‌شود که در همه موارد، قطر برابرسینه به‌دلیل داشتن بیشترین همبستگی با مقادیر زی‌توده، مهم‌ترین متغیر عامل (مستقل) معرفی شده است (Ketterings et al., 2001; Zianis and Mencuccini, 2003; Djomo et al., 2010). همان‌طور که در جدول ۵ نیز مشخص است، کلیه مدل‌های ارائه‌شده، مدل توانی هستند که در همه موارد قطر برابر سینه، مهم‌ترین عامل معرفی می‌شود. البته براساس تئوری متابولیک^۱ نمای مدل (b) در مدل‌های توانی محاسبات زی‌توده درختان حدود ۲/۶ است (Alvarez et al., 2012). در این راستا برخی دیگر از مطالعات به‌طور جامع نمای مدل‌های مذکور را ارزش عددی بین ۲ و ۳ معرفی می‌کنند (Zianis and Mencuccini, 2003; Djomo et al., 2010).

¹ Metabolic theory

رضایی، عبدالمجید، ۱۳۹۰. مفاهیم آمار و احتمالات، انتشارات مشهد، ۴۴۶ ص.

مروی مهاجر، محمدرضا، ۱۳۸۴. جنگل‌شناسی و پرورش جنگل، انتشارات دانشگاه تهران، ۳۸۷ ص.

نمیرانیان، منوچهر، ۱۳۸۵. اندازه‌گیری درخت و زیست سنجی جنگل، انتشارات دانشگاه تهران، ۵۷۴ ص.

واحدی، علی‌اصغر، اسداله متاجی، ساسان بابایی کفاکی، جواد اسحاقی‌راد و سید محمد حجتی، ۱۳۹۲. مدلسازی زی‌توده تنه گونه راش (*Fagus orientalis* Lipsky) با استفاده از معادلات آلومتری در جنگل‌های هیرکانی، مجله جنگل ایران، ۳: ۳۰۹-۳۲۲.

Ajit, D., K. Das, O.P. Chaturvedi, N. Jabeen, and S.K. Dhyani, 2011. Predictive models for dry weight estimation of above and below ground biomass components of *Populus deltoides* in India: Development and comparative diagnosis, *Biomass and Bioenergy*, 35: 1145-1152.

Alvarez, E., A. Duque, J. Saldarriaga, K. Cabrera, G.D.L. Salas, L.D. Valle, A. Lema, F. Moreno, S. Orrego, and L. Rodriguez, 2012. Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia, *Forest Ecology and Management*, 267: 297-308.

Bartelink, H.H., 1997. Allometric relationships for biomass and leaf area of beech (*Fagus sylvatica* L.), *Annals of Forest Science*, 54: 39-50.

Basuki, T.M., P.E. Van Laake, A.K. Skidmore, and Y.A. Hussin, 2009. Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests, *Forest Ecology and Management*, 257: 1684-1694.

Djomo, A.N., I. Adamou, S. Joachim, and G. Gode, 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.

هیرکانی که در سطح کلان کمتر تحت مطالعه آلومتری قرار گرفته‌اند یا اطلاعات مربوط به آن در دسترس نیست و هنوز نتایج جامعی در این زمینه وجود ندارد، می‌تواند بسیار کارآمد واقع شود. نکته اساسی در مورد استفاده از این نوع معادلات، انتخاب درست آنها برای برآورد است. (Alvarez et al. (2012). در این مورد بیان کردند که شرط استفاده از این نوع معادلات در کلیه رویشگاه‌ها به ترتیب در سطح محلی، منطقه‌ای و جهانی انطباق درجه حرارت یا ناحیه کلیماتیکی، مقدار بارندگی و گونه مربوط است. منطقه تحقیق حاضر، جنگل‌های راش محسوب می‌شود و اطلاعات دقیقی درباره مقادیر مطلق کلیماتیکی آن وجود ندارد. اما به راحتی می‌توان اذعان کرد که با توجه به اینکه گونه‌های مختلف درختان راش کلیماتیک هستند و تقریباً در یک ناحیه کلیماتیکی مشابه از لحاظ دما، رطوبت و مقدار بارندگی پراکنش دارند (مروی مهاجر، ۱۳۸۴)، استفاده از دیگر معادلات آلومتری مربوط به درختان راش رویشگاه‌های دیگر می‌تواند در زمینه برآورد زی‌توده درختان راش به‌ویژه زمانی که شرایط حفاظتی در منطقه وجود دارد و نمونه‌برداری تخریبی و اندازه‌گیری مستقیم نیز اجرایی نیست، بسیار مناسب و تأثیرگذار باشد.

سپاسگزاری

از کلیه داوران محترم که با بیان دیدگاه‌های ارزشمند، اشکالات موجود را برطرف کردند و سبب افزایش کیفیت دستاورد حاضر شدند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

منابع

بردبار، سید کاظم و سید مرتضی مرتضوی جهرمی، ۱۳۸۵. بررسی پتانسیل ذخیره کربن در جنگل‌کارهای اکالیپتوس (*Eucalyptus camaldulensis*) و آکاسیا (*Acacia salicina*) در مناطق غربی استان فارس، پژوهش و سازندگی، ۷۰: ۹۵-۱۰۳.

- Henry, M., A. Besnard, W.A. Asante, J. Eshun, S. Adu-Bredu, R. Valentini, M. Bernoux, and L. Saint-André, 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.
- Joosten, R., J. Schumacher, C. Wirth, and A. Schulte, 2004. Evaluating tree carbon predictions for beech (*Fagus sylvatica* L.) in western Germany, *Forest Ecology and Management*, 189: 87- 96.
- Ketterings, Q.M., R. Coe, M.V. Noordwijk, Y. Ambagau, and C.A. Palm, 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.
- Kirby, K.R., and C. Potvin, 2007. Variation in carbon storage among tree species: Implications for the management of a small-scale carbon sink project, *Forest Ecology and Management*, 246: 208–221.
- MacDicken, K.G., 1997. A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects, Winrock international institute for agricultural development, 87 pp.
- 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 M.A. Arain, 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.C., L. Fehrmann, C. Pedro Boechat Soares, L. Antônio Gonçalves Jacovine, C. Kleinn, and R. de Oliveira Gaspar, 2011. Above- and belowground biomass in a Brazilian Cerrado, *Forest Ecology and Management*, 262: 491–499.
- Santa Regina, I., and T. Tarazona, 2001. Organic matter and nitrogen dynamics in a mature forest of common beech in the Sierra de la Demanda, Spain, *Annals of Forest Science*, 58: 301–314.
- Ter-Mikaelian, M.T., and M.D. Korzukhin, 1997. Biomass equations for sixty-five North American tree species, *Forest Ecology and Management*, 97: 1–24.
- Vann, D.R., P.A. Palmiotto, and S. Richard, 1998. Allometric equations for two South American conifers: Test of a non-destructive method, *Forest Ecology and Management*, 106: 55–71.
- Wutzler, T., C. Wirth, and J. Schumacher, 2008. Generic biomass functions for Common beech (*Fagus sylvatica*) in Central Europe: predictions and components of uncertainty, *Canadian Journal of Forest Research*, 38: 1661–1675.
- Zhang, Q., C. Wang, X. Wang, and X. Quan, 2009. Carbon concentration variability of 10 Chinese temperate tree species, *Forest Ecology and Management*, 258: 722–727.
- Zhu, B., X. Wang, W. Fang, S. Piao, H. Shen, S. Zhao, and C. Peng, 2010. Altitudinal changes in carbon storage of temperate forests on Mt Changbai, Northeast China, *Journal of Plant Research*, 123: 439–452.
- Zianis, D., and M. Mencuccini, 2003. Aboveground biomass relationships for beech (*Fagus moesiaca* Cz.) trees in Vermio Mountain, northern Greece, and generalized equations for *Fagus* sp, *Annals of Forest Science*, 60: 439-448.
- Zianis, D., and M. Mencuccini, 2004. On simplifying allometric analyses of forest biomass, *Forest Ecology and Management*, 187: 311–332.

Assessing the possible estimation of bole carbon sequestration of beech (*Fagus orientalis*) in the Hyrcanian forests using non-destructive methods

A.A Vahedi^{1*}, and A. Mataji²

¹Ph.D of Forest Ecology and Silviculture, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, I. R. Iran

²Associate Prof., Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, I. R. Iran

(Received: 18 February 2015, Accepted: 22 June 2015)

Abstract

Trees are considered as huge carbon pools associated with C emission in the atmosphere in the forest ecosystem. Therefore, how to measure and how to estimate the C stored in the trees in the forests is the main issue for ecologists. Since the majority of tree weights are related to the bole mass, we used the non-destructive method to estimate the C stock of oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in the Hyrcanian forests as a case study in Glandrood forests of Nour. C concentration was obtained by ignition in 400°C. The bole mass was estimated by the relationship between volume and wood density and allometric models of beech in various biomes. Carbon concentration was 57 percent of carbon sequestration of bole mass in this study. According to the mean residual and non-significant t-values acquired by paired t-test between the estimated values and observations, allometric model of $Y = \exp(2.53 \ln D - 3.03)$ for common beech (*F. sylvatica*) in the western parts of Germany and product of volume and density introduced in this study ($Y = 0.0239 (D^2H)$) regarding to calculated carbon coefficients are more accurate for estimating the carbon stock of beech trees in the Hyrcanian forests.

Keywords: Allometric equations, Biomass, Carbon cycle, Non-destructive methods, Oriental beech.