فصلنامه علمی - پژوهشی تحقیقات جنگل و صنوبر ایران
جلد ۲۴ شماره ۱، صفحه ۱۱۵-۱۰۳، (۱۳۹۵)

بررسی دقت برآورد ترسیب کربن روی زمینی پلت (*Acer velutinum* Bioss.) در جنگل‌های هیرکانی با استفاده از روش‌های تخریبی و غیرتخریبی

علی‌اصغر واحدی[۱*]، خشایار سالار[۲] و علیرضا بیژنی‌نژاد[۳]

۱*- نویسنده مسئول، دکتری جنگل‌داری، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
پست الکترونیک: ali.vahedi60@gmail.com
۲- کارشناس ارشد جنگل‌داری، صنایع چوب و کاغذ مازندران، ساری، ایران
۳- کارشناس ارشد جنگل‌داری، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری نوشهر، نوشهر، ایران

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۳/۱۷ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۶/۲۳

چکیده

خشکسالی و بحران محیط زیستی ناشی از پدیده گرمایش زمین و تغییرات اقلیم یکی از مهم‌ترین چالش‌های عصر حاضر محسوب می‌شود. از آنجایی‌که جذب دی‌اکسیدکربن اتمسفر به‌عنوان مهم‌ترین عامل گرمایش زمین در اکوسیستم‌های جنگلی بسیار مهم است، برآورد صحیح ترسیب کربن در اجزای درختان یکی از راه‌حل‌های مهم برای برنامه‌ریزی و مدیریت بحران پیش‌رو است. در پژوهش پیش‌رو ۲۰ درخت پلت (*Acer velutinum* Bioss.) با حداکثر چهار تکرار در طبقات قطری مختلف در جنگل‌های اشتروش چمستان انتخاب شدند و پس از قطع به دو قسمت تنه و تاج تقسیم‌بندی شدند. سپس چگالی ویژه و ضریب کربن بخش‌های مختلف آنها به‌دست آمد. برآورد روش غیرتخریبی ترسیب کربن از حاصل‌ضرب حجم بخش‌های مختلف (تنه، تاج)، چگالی ویژه و ضریب کربن به‌دست آمد. مدل‌سازی آلومتریک نیز با استفاده از روش توزین کلیه بخش‌های استحصال‌شده با استفاده از اندازه‌گیری ضریب خشکی هر بخش انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده از آزمون تجزیه واریانس نشان داد که ضریب کربن اندازه‌گیری‌شده بین بخش‌های مختلف درخت معنی‌دار نبود، در صورتی‌که تغییرات چگالی ویژه بین تاج و بخش‌های پایینی و میانی تنه درختان معنی‌دار بود. مدل‌سازی آلومتریک نشان داد که مدل نمایی بازتبدیلی شامل قطر برابر سینه و قطر تاج به‌عنوان مدل بهینه با حداکثر دقت پیش‌بینی ترسیب کربن روی زمینی درختان پلت بود. برای مقایسه دقت برآورد روش‌های مذکور، نتایج به‌دست‌آمده از آزمون t جفتی بین مشاهدات و برآورد به‌دست‌آمده از روش غیرتخریبی نشان داد که برآورد ترسیب کربن روی زمینی (زی‌توده تنه + زی‌توده تاج) درختان پلت دارای عدم قطعیت زیاد و غیر قابل اعتماد بود. درمقابل، نتایج آزمون t جفتی بین خروجی‌های کلیه مدل‌ها و مشاهدات نشان داد که آلومتریک بهینه ترسیب کربن روی زمینی درختان پلت با حداکثر اعتماد دارای قطعیت برآورد بود.

واژه‌های کلیدی: پلت، ترسیب کربن، چگالی ویژه، معادلات آلومتریک.

مقدمه

یکی از مهم‌ترین عامل‌های ایجاد گرمایش زمین و به‌دنبال آن تغییر اقلیم، انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌خصوص گاز دی‌اکسیدکربن در فضای اتمسفری است (Nijnik *et al.*, 2013). اگرچه بحران کاهش آب به‌خصوص در ایران مربوط به مدیریت‌های ضعیف، کشاورزی نامناسب و

دست‌اندازی‌های عامل‌های انسانی است، اما بخش وسیعی از آن مربوط به پدیده گرمایش زمین و تغییرات اقلیمی است. گرمایش زمین نه‌تنها همه عامل‌های محیط زیستی و منابع طبیعی ازجمله آب و تنوع زیستی گیاهی و جانوری را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه مهم‌ترین اثرات منفی را به رفاه اجتماعی و اقتصاد یک کشور وارد می‌کند (Hayha *et al.*, 2015; Bergh & Botzen, 2015). از این‌رو، ترسیب کربن در لایه‌های زیستی زمین به‌ویژه در اکوسیستم‌های جنگلی به‌عنوان مهم‌ترین، بهترین و کم‌هزینه‌ترین راه حل برای کاهش خسارات بحران مذکور شناخته می‌شود (Nijnik *et al.*, 2013). بدین ترتیب اندازه‌گیری هر چه دقیق‌تر مقادیر مختلف کربن ترسیب‌شده در اکوسیستم‌های جنگلی یکی از مهم‌ترین موضوعات مورد بررسی بوم‌شناسان برای ارزیابی، مدیریت برنامه‌ریزی‌شده و مهار بحران کنونی است (Brown, 2002; Li & Tang, 2006).

عدم استفاده از روش‌های استاندارد برای برآورد و پیش‌بینی ذخایر کربن آلی در درختان جنگلی و یا عدم اطلاعات قابل اعتماد در رابطه با مقادیر کربن ترسیب‌شده در اکوسیستم‌های جنگلی، به‌عنوان مهم‌ترین موانع مدیریت افزایش جذب کربن اتمسفری و میزان انتشار آن در اتمسفر در ارتباط با چرخه کربن (Carbon cycle) محسوب می‌شوند (Vahedi & Mataji, 2014). دقیق‌ترین روش اندازه‌گیری مقادیر مختلف ترسیب کربن در زی‌توده گیاهی روش قطع و توزین است، اما این روش هزینه‌بردار، محدود به مقیاس خیلی کوچک و حتی ناممکن است (Ketterings *et al.*, 2001; Vahedi & Mataji, 2014). در مقابل آن، روش غیرتخریبی استفاده از رابطه محاسباتی حاصل‌ضرب حجم، چگالی ویژه و ضریب کربن وجود دارد که به‌صورت برآوردی مقادیر ترسیب کربن را محاسبه می‌کند (Peichl & Arain, 2006; Vahedi & Mataji, 2014). اگرچه روش مذکور نسبت به روش اندازه‌گیری مستقیم کم‌هزینه‌تر و آسان‌تر محسوب می‌شود، اما دارای عدم قطعیت بیشتری است (Vahedi & Mataji, 2014)، بنابراین، بسط معادلات آلومتریک با ترکیب بهینه و دقت (Accuracy) پیش‌بینی زیاد در سطح کلان به‌ویژه برای درختان در اکوسیستم‌های جنگلی پیشنهاد می‌شود تا بتوان از این طریق برآوردی نزدیک به واقعیت برای مقادیر مختلف کربن ترسیب‌شده و یا میزان انتشار آن داشت.

در رابطه با مدل‌سازی آلومتریک به‌منظور برآورد اجزای مختلف زی‌توده و ترسیب کربن روی زمینی درختان در اکوسیستم‌های جنگلی تحقیقات زیادی انجام شده است. ازجمله این پژوهش‌ها می‌توان به مطالعه Zianis و Mencuccini (۲۰۰۳) در مورد ارایه مدل آلومتریک بهینه برای تخمین زی‌توده درختان راش (*Fagus moesiaca*) در جنگل‌های مناطق شمالی یونان، تحقیق Djomo و همکاران (۲۰۱۰) در رابطه با استفاده از معادلات آلومتریک برای برآورد زی‌توده در جنگل‌های آمیخته تروپیکال، پژوهش Beets و همکاران (۲۰۱۲) درخصوص استفاده از معادلات آلومتریک برای برآورد موجودی کربن در جنگل‌های طبیعی زلاندنو، مطالعه Ekoungoulou و همکاران (۲۰۱۴) در رابطه با تبیین معادله آلومتری درختان در جنگل‌های استوایی کنگو برای برآورد ترسیب کربن روی زمینی و همچنین تحقیقات Vahedi و همکاران (۲۰۱۳) و Vahedi (۲۰۱۴) به‌ترتیب در رابطه با ارایه مدل آلومتریک بهینه برای برآورد زی‌توده تنه درختان راش و ممرز در جنگل‌های هیرکانی و تحقیقات دیگر انجام‌شده در زیست‌بوم‌های مختلف اشاره کرد. در تمامی مطالعات مذکور قطر برابرسینه، ارتفاع درختان و دیگر کمیت‌های قابل اندازه‌گیری درختان به‌عنوان متغیر مستقل با دقت پیش‌بینی زیاد یا قابل قبول برای برآورد زی‌توده و ترسیب کربن روی زمینی درختان مورد استفاده قرار گرفتند.

در پژوهش پیش‌رو درختان پلت (*Acer velutinum* Bioss.) برای بررسی انتخاب شدند. درختان پلت یکی از انواع زیاد گونه‌های درختی در جنگل‌های شمال ایران محسوب می‌شوند که به‌عنوان گونه‌ای نیمه‌نورپسند در اشکوب‌های فوقانی توده‌های آمیخته جنگل‌های مذکور پراکنش دارند (Marvie Mohajer, 2004). درختان پلت در جنگل‌های شمال کشور سهم قابل توجهی در رابطه با مخازن

کربن آلی دارند. در جنگل‌های هیرکانی، متأسفانه اطلاعات دقیق و جامعی از ذخایر مخازن کربن آلی درختان گونه‌های مختلف وجود ندارد تا با استفاده از آن بتوان سهم واقعی جنگل‌های هیرکانی را درخصوص چرخه کربن در سطح ملی و حتی در مقیاس جهانی به‌دست آورد. از این‌رو با ارایه معادلات آلومتریک برای گونه مورد مطالعه (Species-specific allometric equation) در یک مقیاس تعریف‌شده با شرایط رویشگاهی مشابه در جنگل‌های شمال می‌توان برای برآورد ترسیب کربن در جنگل‌های شمال به نتایجی نزدیک به واقعیت دست یافت. انجام روش‌های تخریبی در جنگل‌های شمال برای اندازه‌گیری و برآورد ترسیب کربن بسیار دشوار، هزینه‌بردار و در بیشتر موارد به‌دلیل شرایط اکولوژیکی و مدیریتی ناممکن است. هدف نهایی پژوهش پیش‌رو این بود که مشخص شود روش غیرتخریبی می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش تخریبی محسوب شود یا خیر. از این‌رو در پژوهش پیش‌رو از روش غیرتخریبی برای برآورد ترسیب کربن روی زمینی درختان پلت استفاده شد تا با استفاده از مدل‌سازی آلومتریک تعیین شود که بین برآورد به‌دست‌آمده از روش‌های تخریبی و غیرتخریبی چه مقدار خطای محاسباتی وجود دارد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

پژوهش پیش‌رو در قطعه ۱۷ سری ۱۲ اشتروش جنگل‌های چمستان نور واقع در حوضه آبخیز ۵۱ غرب هراز انجام شد. مساحت قطعه مذکور ۶۴ هکتار است و بین عرض‌های جغرافیایی ″۵۲ ′۲۴ °۳۶ و ″۲۰ ′۲۹ °۳۶ و طول‌های جغرافیایی ″۲۵ ′۱۱ °۵۲ و ″۱۵ ′۰۷ °۵۲ قرار دارد. ارتفاع از سطح دریا در منطقه بین ۲۲۰ تا ۲۵۰ متر است. در جنگل مورد مطالعه پلت به‌صورت آمیخته با بلوط، انجیلی و ممرز پراکنش دارد. جهت عمومی منطقه به‌طور عمده شمال شرقی است (Anonymous, 2004). بافت خاک کمی سنگین به‌صورت لومی- رسی و سنگین لومی- سیلتی است. میانگین بیشینه و کمینه دما به‌ترتیب در اواسط مردادماه ۲۹/۷ درجه سانتی‌گراد و در بهمن‌ماه ۲/۲ درجه سانتی‌گراد است. متوسط بارندگی سالانه بیشتر از ۸۴۲ میلی‌متر است که میانگین حداقل بارندگی در تیرماه (۳۹/۵ میلی‌متر) و میانگین حداکثر بارندگی در آبان‌ماه (۱۳۰/۴ میلی‌متر) گزارش شده است.

روش پژوهش

بیست درخت پلت برمبنای طبقات قطری براساس روش تصادفی با مونه‌بندی (Stratified random sampling) برای قطع و نمونه‌برداری انتخاب شدند (Vahedi, 2014). برای اندازه‌گیری زی‌توده، درختان پلت به دو بخش مجزای تنه و تاج تقسیم‌بندی شدند. تنه درختان از انتهای کنده تا محلی که تاج درخت آغاز می‌شود و تاج درختان شامل شاخه اصلی (Main branch) و مجموع شاخه‌های فرعی و ریزشاخه‌ها (Foliage) درنظر گرفته شد (Kirby & Potvin, 2007; Vahedi *et al.*, 2013). در پژوهش پیش‌رو از احتساب برگ‌ها در هنگام توزین خودداری شد. حداکثر چهار درخت به روش طبقه‌ای تصادفی، قبل از قطع از هر یک از پنج طبقه قطری از پیش تعیین‌شده انتخاب شدند. حداقل طبقه قطری ۲/۵ تا ۷/۵ سانتی‌متر و حداکثر آن مربوط به طبقه قطری ۱۷/۵ تا ۲۲/۵ سانتی‌متر بود. پارامترهای کمی شامل قطر برابر سینه، ارتفاع، قطر بزرگ و کوچک تاج قبل از قطع درختان اندازه‌گیری شدند. به‌منظور اندازه‌گیری زی‌توده تنه، پس از قطع درختان، به‌ازای دو متر از طول ساقه اصلی درختان، یک دیسک کامل برداشت شد (Vahedi, 2014). دیسک‌برداری پس از قطع تا حد ممکن به‌ازای دو متر طول درخت از انتهای کنده به سمت انتهای سرشاخه اصلی درختان برداشت شد. سپس هر بخش از ساقه دیسک‌برداری‌شده به‌ازای طول مذکور در عرصه با ترازو تا دقت ۰/۱ کیلوگرم توزین شد. از دو طرف مخالف هر یک از دیسک‌های برداشت‌شده، قطعات چوب به‌صورت مکعب‌های دو سانتی‌متری جدا شدند. نمونه‌های برداشت‌شده به آزمایشگاه منتقل شدند و پس از اندازه‌گیری وزن تر هر نمونه در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت خشک و دوباره توزین شدند (Aboal *et al.*, 2005;

Henry *et al.*, 2010; Rebeiro *et al.*, 2011; Vahedi *et al.*, 2014). وزن هر بخش از تنه درختان در ضریب خشکی مربوط به همان بخش ضرب شد تا زی‌توده (وزن خشک) بخش مذکور محاسبه شود. درنهایت، زی‌توده کل یک درخت از مجموع زی‌توده محاسبه‌شده هر بخش از تنه و تاج محاسبه شد. برای اندازه‌گیری مقدار ضریب کربن محاسباتی، کلیه نمونه‌های چوبی مدنظر پس از نمونه‌برداری با جرم ثابت در کوره حرارتی با دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای برآورد غیرتخریبی ترسیب کربن روی زمینی درختان پلت از رابطه‌های آلومتریک ۱ تا ۳ استفاده شد (Vahedi & Mataji, 2014):

رابطه (۱) $\langle AGC \rangle_{Bole} = V_b \times WD_b \times [C]$

رابطه (۲) $\langle AGC \rangle_{Crown} = V_c \times WD_c \times [C]$

رابطه (۳) $\langle AGC \rangle_{Total} = \langle AGC \rangle_{Bole} + \langle AGC \rangle_{Crown}$

در رابطه‌های فوق: $\langle AGC \rangle_{bole}$ و $\langle AGC \rangle_{Crown}$ به‌ترتیب اندوخته کربن تنه درختان و اندوخته کربن تاج درختان و V_b حجم تنه ($V_b = л\ dbh^2 / 4 \times h \times f$) است که در آن مقدار ضریب شکل f، ۰/۵ درنظر گرفته می‌شود (Namiranian, 2003; Vahedi & Mataji, 2014). V_c حجم تاج $[(л \times db^2)/۱۲]$ است که در آن db میانگین قطر تاج است. WD_b و WD_c نیز به‌ترتیب چگالی ویژه تنه و تاج و C مقدار ضریب کربن (که به‌طور عمومی ۵۰ درصد درنظر گرفته می‌شود) هستند (Vahedi & Mataji, 2014). در رابطه با حجم تاج، با استقرار در محل زیر تاج، به‌طور تخمینی میزان خلاء حجمی مربوط به تاج هر درخت برآورد شد. در همه روابط فوق، مقادیر ترسیب کربن بر حسب کیلوگرم یا تن، حجم بر حسب متر مکعب و جرم حجمی بر حسب متر مکعب بر کیلوگرم است.

چگالی ویژه یا همان چگالی خشک (Dry wood density یا Specific wood density) از نسبت جرم خشک به حجم تر هر یک از نمونه‌های چوبی برداشت‌شده (۲×۲×۲ سانتی‌متر) محاسبه شد (Vahedi & Mataji, 2014). برای محاسبه مقدار ضریب کربن محاسباتی از رابطه‌های ۴ و ۵ استفاده شد (Allen *et al.*, 1986; Vahedi & Mataji, 2014):

رابطه (۴) $Ash\ \% = (W_3 - W_1) / (W_2 - W_1) \times ۱۰۰$

رابطه (۵) $C\ \% = (۱۰۰ - Ash\%) \times ۰/۵۸$

در روابط فوق، Ash % درصد خاکستر به‌دست‌آمده پس از سوزاندن کامل لایه چوبی، W_1 وزن ظرف (بوته چینی)، W_2 وزن خشک نمونه، W_3 مجموع وزن خاکستر و بوته چینی مورد استفاده و C% ضریب کربن محاسباتی است. برای بررسی معنی‌داری چگالی ویژه و ضریب کربن محاسباتی بین مقاطع طولی درختان پلت از آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه استفاده شد. بدین منظور با توجه به دیسک‌برداری به‌ازای دو متر طول تنه، تنه همه درختان قطع‌شده در راستای عمودی به سه بخش ۵٪، ۳۵٪ و ۶۵٪ تقسیم‌بندی شد تا مقایسه چگالی (و ضریب کربن محاسباتی) در مقاطع طولی ثابت درختان انجام گیرد (Machado *et al.*, 2014). برای مقایسه چندگانه میانگین نیز از آزمون توکی استفاده شد.

برای مدل‌سازی آلومتری به‌منظور ارایه مدل بهینه برای برآورد نزدیک به واقعیت ترسیب کربن روی زمینی درختان، مشاهدات به‌دست‌آمده از روش قطع و توزین با استفاده از قطر برابر سینه، ارتفاع کل و قطر متوسط تاج برازش شدند. در این خصوص از روش حداقل مربعات استفاده شد و متغیرهای مستقل به‌صورت گام‌به‌گام با ترکیب متفاوت در معادلات وارد شدند (Vahedi, 2014). کلیه مدل‌های پایه

برای برازش مورد آزمون قرار گرفتند. طی فرآیند تجزیه و تحلیل، مدل توانی پایه ($Y = a \times x^b$) با حداقل میانگین مربعات باقی‌مانده (*RMS*)، حداقل خطای تخمین (*SEE*) و حداکثر ضریب تبیین تعدیل‌شده (R^2_{adj}) به‌عنوان مدل آلومتریک پایه در پژوهش پیش‌رو محسوب شد. از این‌رو برای عدم ناهمگنی پراکنش و ورود متغیرهای مستقل به‌صورت گام‌به‌گام با ترکیب مختلف، مدل توانی مذکور به‌صورت لگاریتمی خطی تغییر شکل یافت ($\ln Y = \ln a + b \times \ln X$) که با استفاده از ضریب تصحیح (*CF*) در بازتبدیل معادله نمایی مقادیر ترسیب کربن نزدیک به واقعیت بر حسب کیلوگرم یا تن برآورد شد (Djomo *et al.*, 2010; Vahedi *et al.*, 2013; Vahedi, 2014).

برای تعیین اعتبار آماری برآورد زی‌توده با روش‌های مورد استفاده، از آزمون t جفتی بین نتایج مربوط به تخمین هر یک از معادلات آلومتریک مورد استفاده و مشاهدات استفاده شد (Ajit *et al.*, 2011). درنهایت مقدار t جفتی و میانگین درصد انحراف معیار به‌ترتیب اولویت برای انتخاب مدل با بیشترین دقت تخمین استفاده شد (Ajit *et al.*, 2011). برای محاسبه ریشه میانگین مربعات خطا (*RMSE*) از رابطه ۶ استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left[\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)\right]^2} \Rightarrow 0 \le RMSE$$

رابطه (۶)

در رابطه فوق: n تعداد کل مشاهدات و $\check{Z}(x_i)$ و $Z(x_i)$ به‌ترتیب مقادیر زی‌توده برآوردی و واقعی هستند.

نتایج

جدول ۱ نتایج تجزیه واریانس به‌دست‌آمده از تغییرات چگالی و ضریب کربن محاسباتی در راستای عمودی درختان پلت را نشان می‌دهد. با توجه به جدول مذکور، چگالی ویژه چوب درون‌پایه‌ای درختان پلت دارای تغییرات معنی‌داری بود ($p < 0/01$). جدول ۳ نشان می‌دهد که این اختلاف درون‌پایه‌ای بین تاج و قسمت‌های مختلف تنه درختان بود. تغییرات چگالی ویژه چوب بین درختان مختلف پلت (جدول ۲) نشان داد که به‌جز چگالی بخش انتهایی تنه، بین چگالی بخش‌های مختلف تنه (بین درختان مختلف) و تاج درختان تفاوت معنی‌دار وجود داشت. البته با توجه به جدول ۳ که نتایج به‌دست‌آمده از آزمون توکی را نشان می‌دهد، چگالی ویژه چوب در راستای تنه درون‌پایه‌ای دارای تفاوت معنی‌داری نبود ($p > 0/05$) و همان‌طورکه مشهود است فقط چگالی ویژه تاج درختان به‌صورت معنی‌دار مقدار عددی کمتری را نسبت به چگالی بخش‌های مختلف تنه نشان داد.

همان‌طورکه در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است، ضریب کربن در راستای همه درختان و در بین کلیه درختان پلت دارای اختلاف معنی‌داری نبود. جدول ۳ کمینه، بیشینه و معنی‌داری میانگین چگالی ویژه و ضریب کربن درختان مختلف پلت را نشان می‌دهد.

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس چگالی ویژه درون‌پایه‌ای درختان پلت

منبع تغییرات	میانگین مربعات	F	معنی‌داری
چگالی ویژه	۰/۰۰۹	۹/۵۳	۰/۰۰۰**
ضریب کربن	۰/۰۰۴	۰/۰۹۶	۰/۹۶۲ ns

**معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد؛ ns غیرمعنی‌دار

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس چگالی ویژه بین درختان مختلف پلت

منبع تغییرات	میانگین مربعات	F	معنی‌داری
چگالی ویژه			
چگالی ویژه بخش اول تنه (۵٪)	۰/۰۰۱	۷/۸۶	۰/۰۰۴**
چگالی ویژه بخش دوم تنه (۳۵٪)	۰/۰۰۲	۱۱/۲۲	۰/۰۰۱**
چگالی ویژه بخش سوم تنه (۶۵٪)	۰/۰۰۰	۱/۳۷	۰/۳۱۴ns
چگالی ویژه تاج	۰/۰۰۹	۱۷/۱۵	۰/۰۰۰**
ضریب کربن			
ضریب کربن بخش اول تنه (۵٪)	۰/۰۱۵	۰/۳۷۹	۰/۷۷۰ns
ضریب کربن بخش دوم تنه (۳۵٪)	۰/۰۰۷	۰/۱۶۹	۰/۹۱۵ns
ضریب کربن بخش سوم تنه (۶۵٪)	۰/۰۱۳	۰/۵۳۲	۰/۶۰۹ns
ضریب کربن تاج	۰/۰۹۸	۱/۹۴	۰/۱۸۶ns

**معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد؛ ns غیرمعنی‌دار

جدول ۳- میانگین (± اشتباه معیار)، کمینه و بیشینه چگالی و ضریب کربن درختان پلت

منبع تغییرات	کمینه	بیشینه	میانگین
چگالی ویژه بخش اول تنه (۵٪)	۰/۵۸	۰/۶۴	۰/۶۱ ± ۰/۰۱۹ a
چگالی ویژه بخش دوم تنه (۳۵٪)	۰/۵۵	۰/۶۱	۰/۵۹± ۰/۰۲۳ a
چگالی ویژه بخش سوم تنه (۶۵٪)	۰/۵۸	۰/۶۲	۰/۶۰ ± ۰/۰۲۱ a
چگالی ویژه تاج	۰/۴۷	۰/۶	۰/۵۵ ± ۰/۰۱۲ b
ضریب کربن بخش اول تنه (۵٪)	۵۷/۱۳	۵۷/۷۱	۵۷/۵۷ ± ۰/۰۴۷ a
ضریب کربن بخش دوم تنه (۳۵٪)	۵۷/۱۳	۵۷/۷۱	۵۷/۵۵ ± ۰/۰۴۷ a
ضریب کربن بخش سوم تنه (۶۵٪)	۵۷/۴۲	۵۷/۷۱	۵۷/۶۱ ± ۰/۰۴۷ a
ضریب کربن تاج	۵۷/۱۳	۵۷/۷۱	۵۷/۵۶ ± ۰/۰۶۶ a

حروف انگلیسی مشابه، عدم اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح اطمینان ۹۹ درصد را نشان می‌دهد.

جدول ۴ نتایج مدل‌سازی آلومتریک ترسیب کربن درختان پلت را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. با توجه به جدول مذکور ابتدا معادلات ترسیب کربن مربوط به زی‌توده تنه، سپس معادلات ترسیب کربن تاج و درنهایت معادلات کل ترسیب کربن زی‌توده روی زمینی (مجموع زی‌توده تنه و تاج) ارایه شدند. نتایج حاکی از آن بود که مدل تک‌متغیره ترکیبی شامل ترکیب مربع قطر برابر سینه و ارتفاع تنه و یا معادله دارای دو متغیر مستقل قطر و ارتفاع تنه، دارای بیشترین دقت پیش‌بینی و برآورد (CF = ۱/۰۴، R^2_{Adj} = ۰/۹۸۱) ترسیب کربن تنه درختان پلت بودند. در رابطه با مدل‌سازی آلومتریک ترسیب کربن تاج درختان، نتایج نشان داد که معادله بازتبدیل نمایی شامل قطر برابر سینه (قطر یقه در مورد نهال‌ها) و قطر تاج به‌عنوان متغیرهای مستقل، به‌عنوان مدل بهینه برآوردی مقدار ترسیب

کربن تاج درختان بود (R^2_{Adj} = ۰/۹۴۳ ،CF = ۱/۲۵). برای مدل‌سازی ترسیب کربن زی‌توده روی زمینی درختان پلت که از مجموع مقادیر ترسیب کربن تنه و تاج درختان به‌دست آمد، از فرآیندی مشابه در این زمینه استفاده شد. درنهایت، نتایج نشان داد که مدل نمایی شماره ۱۷ مشتمل بر قطر برابر سینه و قطر تاج، بهترین برازش مشاهدات کل ترسیب کربن روی زمینی با حداقل خطای برآوردی را داشت (جدول ۴).

جدول ۴- مدل‌سازی آلومتریک ترسیب کربن اجزای روی زمینی و کل زی‌توده روی زمینی درختان پلت

مدل	مدل‌های آلومتری	a	b	c	d	R^2	Adj.R^2	RMS	SEE	CF	VIF
	ترسیب کربن تنه										
۱	$Y_B = \text{Exp}\,[a + b \ln D]$	−۲/۴۷	۲/۲۹	–	–	۰/۹۶۵	۰/۹۶۳	۰/۱۷	۰/۴۱۳	۱/۰۹	–
۲	$Y_B = \text{Exp}\,[a + b \ln H_B]$	−۲/۶۴	۳/۰۹	–	–	۰/۹۲۶	۰/۹۲۲	۰/۳۵۶	۰/۵۹۷	۱/۲	–
۳	$Y_B = \text{Exp}\,[a + b \ln H_T]$	−۲/۱۸	۲/۱۹	–	–	۰/۸۹۴	۰/۸۸۸	۰/۵۱۳	۰/۷۱۶	۱/۳۱	–
۴	$Y_B = \text{Exp}\,[a + b \ln D^2 \times H_B]$	−۲/۶۵	۰/۸۶	–	–	۰/۹۸۱	۰/۹۸	۰/۰۹	۰/۲۹۹	۱/۰۴	–
۵	$Y_B = \text{Exp}\,[a + b \ln D + c \ln H_B]$	−۲/۷	۱/۵	۱/۱۷	–	۰/۹۸۳	۰/۹۸۱	۰/۰۸۸	۰/۲۹۷	۱/۰۴	۷/۳۶
	ترسیب کربن تاج										
۶	$Y_C = \text{Exp}\,[a + b \ln D]$	−۵/۲۲	۲/۸۸	–	–	۰/۸۷۷	۰/۸۷	۱/۰۳	۱/۰۱	۱/۶۶	–
۷	$Y_C = \text{Exp}\,[a + b \ln H_B]$	−۵/۳۵	۳/۸۴	–	–	۰/۸۱۸	۰/۸۰۸	۱/۵۳	۱/۲۳	۲/۱۲	–
۸	$Y_C = \text{Exp}\,[a + b \ln H_T]$	−۴/۹	۲/۷۷	–	–	۰/۸۲۲	۰/۸۱۳	۱/۴۸	۱/۲۲	۲/۰۹	–
۹	$Y_C = \text{Exp}\,[a + b \ln D^2 \times H_T]$	−۵/۳۶	۰/۹۹۱	–	–	۰/۸۹۶	۰/۸۹	۰/۸۸	۰/۹۳۸	۱/۵۵	
۱۰	$Y_C = \text{Exp}\,[a + b \ln Db]$	۰/۹۸۲	۱/۹۸	–	–	۰/۹۲۶	۰/۹۲۲	۰/۶۲۵	۰/۷۹	۱/۳۶	–
۱۱	$Y_C = \text{Exp}\,[a + b \ln D + c \ln Db]$	−۱/۴۱	۱/۱۱	۱/۳۱	–	۰/۹۴۹	۰/۹۴۳	۰/۴۵۱	۰/۶۷۱	۱/۲۵	۵/۵۴
۱۲	$Y_C = \text{Exp}\,[a + b \ln D + c \ln H_T + \ln Db]$	−۰/۳۰۴	۱/۳۱	−۰/۷۳۲	۱/۶۶	۰/۹۵۵	۰/۹۴۶	۰/۴۳	۰/۶۵۵	۱/۲۳	۱۱/۰۱
	ترسیب کربن کل زی‌توده روی زمینی										
۱۳	$Y_T = \text{Exp}\,[a + b \ln D]$	−۲/۴۱	۲/۳۸	–	–	۰/۹۶۱	۰/۹۵۸	۰/۲۰۸	۰/۴۵۶	۱/۱۱	–
۱۴	$Y_T = \text{Exp}\,[a + b \ln H_B]$	− ۲/۵۸	۳/۲۲	–	–	۰/۹۱۹	۰/۹۱۵	۰/۴۲۴	۰/۶۵۱	۱/۲۳	–
۱۵	$Y_T = \text{Exp}\,[a + b \ln D^2 \times H_B]$	−۲/۵۹	۰/۸۹۵	–	–	۰/۹۷۶	۰/۹۷۵	۰/۱۲۴	۰/۳۵۲	۱/۰۶	–
۱۶	$Y_T = \text{Exp}\,[a + b \ln D + c \ln H_B]$	۲/۶۴	۱/۶	۱/۱۸		۰/۹۷۷	۰/۹۷۵	۰/۱۲۶	۰/۳۵۵	۱/۰۷	–
۱۷	$Y_T = \text{Exp}\,[a + b \ln D + c \ln Db]$	−۰/۷۷	۱/۶۲	۰/۵۶۷	–	۰/۹۸۲	۰/۹۸۱	۰/۱۰۱	۰/۳۱۶	۱/۰۵	۵/۵۴
۱۸	$Y_T = \text{Exp}\,[a + b \ln D + c \ln H_B + \ln Db]$	−۱/۳۲	۱/۳۹	۰/۶۴۳	۰/۴۱۸	۰/۹۸۶	۰/۹۸۳	۰/۰۸۶	۰/۲۹۲	۱/۰۳	۱۰/۴۸

a، b، c : ضرایب پارامتری مدل، D: قطر، H_B: ارتفاع تنه، H_T: ارتفاع کل، Y: ترسیب کربن کل، Y_b: ترسیب کربن تنه، Y_c: ترسیب کربن تاج، Db: قطر تاج، R^2: ضریب تبیین، $Adj.R^2$: ضریب تبیین تعدیل‌شده، *RMS*: میانگین مربعات باقی‌مانده‌ها، *SEE*: اشتباه معیار تخمین، *CF*: فاکتور تصحیح، *VIF*: فاکتور تورم واریانس

جدول ۵ نتایج آزمون t جفتی مربوط به برآورد کلیه مدل‌های آلومتریک بهینه ترسیب کربن اجزای مختلف زی‌توده درختان پلت و مشاهدات به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. درخصوص روش غیرتخریبی، ابتدا نتایج به‌دست‌آمده از احتساب ۵۰ درصد ضریب کربن و سپس نتایج به‌دست‌آمده از مشاهدات ضریب کربن مقایسه شدند.

جدول ۵- نتایج آزمون t جفتی بین مشاهدات و برآورد ترسیب کربن اجزای مختلف زی‌توده درختان پلت

مدل آلومتریک	میانگین باقی‌مانده‌ها	اشتباه‌معیار میانگین	t	RMSE	معنی‌داری
محاسبه تخمینی با فرض ۵۰ درصد ضریب کربن $\langle AGC \rangle_{Bole} = V_b \times WD_b \times [C]$	۱۴/۳۱ (۸/۴۲ -۲۰/۱۹)	۲/۸۱	۵/۰۸	۳۱/۹۵	(۰/۰۰۰)**
$V_c \times WD_c \times [C] \langle AGC \rangle_{Crown} =$	(-۲۴۰/۴۲ -(-۶۴/۳۲)) -۱۵۲/۳۷	۴۲/۰۶	-۳/۶۲	۲۴۲/۳۴	(۰/۰۰۰)**
$\langle AGC \rangle_{Total} = \langle AGC \rangle_{Bole} + \langle AGC \rangle_{Crown}$	(-۲۲۲/۵۸ -(-۵۳/۵۳)) -۱۳۸/۰۶	۴۰/۳۸	-۳/۴۱	۲۶۵/۱۳	(۰/۰۰۳)**
محاسبه تخمینی با احتساب ضریب کربن محاسباتی $\langle AGC \rangle_{Bole} = V_b \times WD_b \times [C]$	۱۱/۷۶ (۶/۶۱ -۱۶/۹۲)	۲/۴۶	۴/۷۷	۳۵/۱۴	(۰/۰۰۰)**
$V_c \times WD_c \times [C] \langle AGC \rangle_{Crown} =$	(-۷۴/۸۲ – (-۳/۶۲)) -۱۷۷/۰۱	۴۸/۸۲	-۳/۶۲	۲۰۴/۱۵	(۰/۰۰۲)**
$\langle AGC \rangle_{Total} = \langle AGC \rangle_{Bole} + \langle AGC \rangle_{Crown}$	(-۲۶۴/۸ – (-۶۵/۶۸)) -۱۶۵/۲۴	۴۷/۵۶	-۳/۴۷	۲۲۳/۷۱	(۰/۰۰۳)**
برآورد ترسیب کربن با استفاده از معادلات آلومتریک $Y_B = Exp\,[a + b \ln D^2 \times H_B]$	-۳/۱۱ (-۸/۸۸ -۲/۶۴)	۲/۷۵	-۱/۱۳	۱۷/۱۲	(۰/۲۷۲)ns
$Y_B = Exp\,[a + b \ln D + c \ln H_B]$	-۲/۸۱ (-۸/۸۳ -۳/۱۹)	۲/۸۷	-۰/۹۸۱	۱۷/۰۷	(۰/۳۳۹)ns
$Y_C = Exp\,[a + b \ln D + c \ln Db]$	-۲/۸۰ (-۵/۴۱ – (-۰/۱۷))	۱/۲۵	-۲/۲۳	۳۷/۵۴	(۰/۰۳۸)*
$Y_T = Exp\,[a + b \ln D + c \ln Db]$	-۳/۵۱ (-۸/۹۰ -۱/۸۶)	۲/۵۷	-۱/۳۶	۱۱/۷۴	(۰/۱۸۷)ns

t: مقدار آماره t جفتی بین مشاهدات و مقادیر برآوردشده، *RMSE*: ریشه میانگین مربعات خطا
**معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد؛ *معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد؛ ns غیرمعنی‌دار

براساس جدول ۵ مقدار t جفتی بین برآورد ترسیب کربن کلیه اجزای روی زمینی درختان پلت (تنه، تاج و کل زی‌توده هوایی) به روش غیرتخریبی و مشاهدات مربوطه معنی‌دار بود ($p <$ ۰/۰۱). همچنین نتایج مربوط به مقدار t و ریشه میانگین مربعات خطا نشان داد که احتساب ضریب کربن اندازه‌گیری‌شده در معادلات مربوط به روش غیرتخریبی، تأثیر چندانی در دقت برآورد ترسیب کربن نداشته است (جدول ۵). در مقابل، مقادیر t جفتی بین مشاهدات ترسیب کربن کلیه اجزای زی‌توده درختان پلت و تخمین مربوط به مدل‌های آلومتریک بهینه هر یک از اجزا، دارای اختلاف معنی‌داری نبود ($p >$ ۰/۰۵). در این میان، فقط نتایج آزمون t جفتی بین برآورد مدل آلومتریک مربوط به تاج درختان و مشاهدات ترسیب کربن تاج با مقدار t = ۲/۲۳ و *RMSE* = ۳۷/۵ معنی‌دار بود ($p <$ ۰/۰۵). جالب توجه است که در بین کلیه مدل‌ها و روابط ارایه‌شده در جدول ۵، برآورد مدل آلومتریک بهینه ترسیب کربن کل زی‌توده روی زمینی درختان پلت نسبت به مقادیر اندازه‌گیری‌شده (مشاهدات) دارای حداقل خطا است.

بحث

نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش پیش‌رو نشان داد که استفاده از روش غیرتخریبی حتی با اندازه‌گیری مستقیم چگالی ویژه و ضریب کربن، دارای دقت قابل قبولی برای برآورد ترسیب کربن روی زمینی درختان پلت نبود. مطالعات مختلفی استفاده از رابطه حجم و چگالی را برای برآورد زی‌توده و ترسیب کربن درختان، در صورت عدم مشاهدات و یا عدم دسترسی به معادلات آلومتریک در اکوسیستم‌های جنگلی پیشنهاد داده‌اند که البته دقت برآورد رابطه پیشنهادی را نشان ندادند (Zhu *et al.*, 2010; Vahedi & Mataji, 2014). در این مورد Vahedi و Mataji (۲۰۱۴)، احتساب ضریب کربن ۵۰ درصدی و ضریب کربن اندازه‌گیری‌شده در رابطه با حجم و چگالی ویژه را برای برآورد ترسیب کربن تنه درختان بلندمازو در جنگل‌های شمال ایران مقایسه کردند و دریافتند که استفاده از ضریب کربن اندازه‌گیری‌شده در رابطه مذکور نسبت به ضریب کربن ۵۰ درصدی، به‌طور قابل ملاحظه‌ای مقادیر ترسیب کربن را بیشتر نشان می‌دهد. در این رابطه، به‌دلیل عدم اندازه‌گیری زی‌توده تنه درختان بلوط، میزان دقت روابط مورد استفاده بیان نشد. جالب است که در پژوهش پیش‌رو نیز استفاده از ضریب کربن محاسباتی (۵۰٪ < [C]) در رابطه مورد اشاره، مقادیر ترسیب کربن بیشتری را نشان داد، اما نتایج به‌دست‌آمده از آزمون t جفتی و میزان خطای برآوردی به‌وضوح نشان داد که نتایج به‌دست آمده دارای عدم قطعیت زیاد می‌باشد. در این راستا دلایل متعددی می‌تواند وجود داشته باشد. دلیل اول می‌تواند مربوط به تغییرات چگالی در راستای عمودی درختان پلت یا مربوط به تغییرات چگالی بین درختان پلت باشد. همان‌طورکه در نتایج پژوهش پیش‌رو نشان داده شد، اگرچه تغییرات معنی‌داری بین بخش‌های مختلف تنه درون‌پایه‌ها مشاهده نشد، اما جرم حجمی ویژه بخش‌های پایینی (پنج درصد راستای عمودی تنه) و میانی (۳۵ درصد راستای عمودی تنه) بین درختان مختلف دارای تغییرات معنی‌داری بود. همان‌طورکه انتظار می‌رود، به‌دلیل قطور بودن بخش‌های پایینی تنه، مقادیر افزایشی زی‌توده تنه نیز معطوف به همین بخش‌های تنه است (Fehrmann & Kleinn, 2006). این امر سبب می‌شود که تغییرات زی‌توده بخش‌های پایینی و میانی تنه بین درختان مختلف به‌دلیل تفاوت در مقدار چگالی ویژه، دارای مقادیر مختلف بوده و روند تغییرات آن نیز متفاوت باشد. دلیل دوم نیز همان‌طور که در نتایج پژوهش پیش‌رو نشان داده شد، تفاوت معنی‌دار بین زی‌توده تنه و تاج و تغییرات معنی‌دار بین چگالی ویژه تاج در بین درختان مورد مطالعه پلت است. این موضوع سبب شده است که محاسبه برآورد ترسیب کربن زی‌توده تاج با عدم قطعیت زیادی مواجه شود. دلیل سوم با توجه به استدلال Vahedi و Mataji (۲۰۱۴)، Henry و همکاران (۲۰۱۰)، Navar (۲۰۰۹)، Aboal و همکاران (۲۰۰۵) و بسیاری از پژوهش‌های انجام‌شده دیگر در کلیه زیست‌بوم‌های مختلف، این است که تغییرات زی‌توده و ترسیب کربن بین درختان مختلف درون‌گونه‌ای و یا برون‌گونه‌ای می‌تواند مربوط به ضریب شکل، معماری و ریخت‌شناسی مربوط به هر یک از درختان مورد مطالعه در طول زمان باشد. در این راستا برخی دیگر از مطالعات تغییرات چگالی ویژه را مربوط به عامل‌هایی مانند اقلیم، شرایط رویشگاهی از جمله عناصر غذایی مورد نیاز و فاکتورهای ادافیکی، رشد متوسط، رقابت، مراحل تحولی و آشفتگی می‌دانند (Green *et al.*, 2007; Mani & Parthasarathy, 2007; Ribeiro *et al.*, 2011) که همه این موارد می‌توانند عامل‌های مهم تأثیرگذار بر شکل ظاهری تنه و تاج درختان نیز محسوب شوند.

نتایج مربوط به اندازه‌گیری ضریب کربن در پژوهش پیش‌رو نشان داد که ضریب کربن محاسباتی مقداری بیشتر از ۵۰ درصد را برای اجزای مختلف درختان پلت در منطقه مورد مطالعه نشان داد. به‌طور معمول در بیشتر مطالعات در صورت عدم اندازه‌گیری ضریب کربن محاسباتی، ضریب مذکور ۵۰ درصد درنظر گرفته می‌شود. Vahedi و Mataji (۲۰۱۴) نیز برای تنه درختان بلندمازو در جنگل‌های شمال کشور ضریب کربن بیشتر از ۵۰ درصد (۵۷ درصد) را اندازه‌گیری کردند که نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق آنها با

مقدار به‌دست‌آمده برای بخش‌های مختلف تنه و تاج درختان پلت در پژوهش پیش‌رو مطابقت دارد. با توجه به این‌که در پژوهش پیش‌رو، ضریب کربن بین بخش‌های مختلف اجزای درختان پلت در راستای عمودی درختان و بین کلیه درختان دارای اختلاف معنی‌داری نبود، از این‌رو مقدار متوسط ضریب کربن در رابطه حجم و چگالی ویژه، برای برآورد ترسیب کربن روی زمینی درختان پلت نمی‌تواند عامل خطا محسوب شود.

در پژوهش پیش‌رو از روش تخریبی نیز برای اندازه‌گیری ترسیب کربن و مدل‌سازی آلومتریک ترسیب کربن اجزای مختلف زی‌توده درختان پلت استفاده شد تا برای مقایسه با روش غیرتخریبی، مبنای دقت برآوردی قرار گیرد. نتایج مدل‌سازی آلومتریک ترسیب کربن تنه درختان پلت نشان داد که قطر و ارتفاع تنه، از عامل‌های مؤثر پیش‌بینی با حداکثر دقت محاسباتی بودند. در رابطه با مدل‌سازی ترسیب کربن تاج و کل ترسیب کربن روی زمینی درختان پلت، قطر برابر سینه و قطر تاج به‌عنوان مهم‌ترین عامل‌های برآورد و پیش‌بینی با بیشترین دقت محسوب شدند. لازم به ذکر است که در مدل‌سازی آلومتریک اجزای مختلف درختان پلت در پژوهش پیش‌رو، از کمیت‌های مورد استفاده با ترکیب‌های متفاوت استفاده شد و فقط مدل‌هایی ارایه شدند که نسبت به مدل‌های دیگر دارای بیشترین دقت پیش‌بینی بودند (جدول ۵). براساس نتایج به‌دست‌آمده، در بین کلیه مدل‌های ارایه‌شده، فقط مدل آلومتریک بهینه ترسیب کربن تاج، دارای حداکثر خطای برآوردی بود و ازنظر آماری دارای قطعیت مورد اعتماد برای پیش‌بینی زی‌توده تاج درختان نبود (t = −۲/۲۳). این موضوع می‌تواند به این دلیل باشد که تاج درختان مورد مطالعه به‌صورت متقارن نبودند و با توجه به میزان گستردگی آنها، مقادیر زی‌توده (مقدار وزن خشک) به‌صورت نامتوازن در بین اجزای آنها وجود داشت. دلیل عدم تقارن تاج و توزیع ناموزون زی‌توده در تاج می‌تواند به نحوه کسب عناصر غذایی درختان، رقابت، اشغال آشیان فیزیولوژیک هر یک از درختان و نیز ویژگی‌های مورفولوژیکی و ژنتیکی هر یک از درختان گونه مورد مطالعه مرتبط باشد. در رابطه با برآورد زی‌توده تاج می‌توان به مطالعات Sohrabi و Shirvani (۲۰۱۱) و Parsapour و همکاران (۲۰۱۲) به‌ترتیب درخصوص زی‌توده تاج درختان بنه و سپیدار اشاره کرد. در مطالعات مذکور با استفاده از مدل غیرخطی (توانی)، برآورد زی‌توده تاج بنه با استفاده از قطر تاج، با حداکثر ضریب تبیین R^2 = ۰/۹۲ و اشتباه معیار SEE = ۰/۳۴ و تخمین زی‌توده تاج سپیدار نیز با استفاده از قطر برابر سینه با ضریب تبیین R^2 =۰/۹۴ و اشتباه معیار SEE = ۰/۲۲ انجام شد. در پژوهش پیش‌رو نیز ترسیب کربن تاج درختان با دقتی مشابه با مطالعات مذکور (R^2_{adj} = ۰/۹۴، SEE =۰/۶۷) برآورد شد، اما همان‌طور که بیان شد نتایج به‌دست‌آمده از آزمون t نشان داد که ازنظر آماری، مدل مربوطه دارای قطعیت برآورد نبود. نتایج اعتبارسنجی مدل ۱۲ و ۱۸ نیز نشان داد که اگرچه مدل‌های مذکور دارای حداکثر دقت برآوردی و حداقل فاکتور تصحیح (CF) در بین مدل‌های ترسیب کربن اجزای مربوطه درختان پلت بودند، اما با توجه به این‌که میزان فاکتور تورم واریانس این مدل‌ها بیشتر از ۱۰ بود (VIF >۱۰)، از این‌رو مدل‌های مذکور به‌دلیل هم‌خطی چندگانه (Colliniarity) دارای اعتبار محاسباتی نبوده و قابل قبول نبودند. البته با توجه به این‌که حداکثر ترسیب کربن روی زمینی مربوط به ترسیب کربن تنه درختان پلت است، از این نظر مدل بهینه آلومتریک ترسیب کربن روی زمینی درختان پلت، به‌عنوان پیش‌بینی‌کننده قابل اعتماد محسوب می‌شود. در بسیاری از مطالعات بر این نکته تأکید شده است که اضافه کردن ارتفاع درختان به‌عنوان متغیر ترکیبی و یا به‌عنوان متغیر مستقل علاوه بر قطر برابرسینه، اگرچه تاحدودی باعث کاهش عدم قطعیت برآورد زی‌توده و یا ترسیب کربن مدل آلومتریک می‌شود، اما به‌طور معمول سبب می‌شود که روند افزایشی دقت مدل مربوطه بسیار کند و ناچیز باشد (Vahedi, 2014). نتایج مدل‌سازی این پژوهش نیز نشان داد که اضافه کردن ارتفاع باعث افزایش ناچیز دقت برآوردی ترسیب کربن روی زمینی درختان شده است. در مقابل، نتایج جالب توجه این

بود که در مدل بهینه ترسیب کربن روی زمینی درختان مورد مطالعه (مدل ۱۷)، به جای ارتفاع تنه و یا ارتفاع کل، قطر تاج علاوه بر قطر برابر سینه عاملی تأثیرگذار در افزایش دقت پیش‌بینی متغیر هدف محسوب شد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش پیش‌رو و تفسیرهای انجام‌شده می‌توان نتیجه‌گیری کرد که برآورد ترسیب کربن روی زمینی با استفاده از مدل‌سازی آلومتریک، برخلاف برآورد غیرتخریبی، دارای دقت بسیار زیاد و قابل اعتماد است. از این‌رو پیشنهاد می‌شود برای برآورد هر چه دقیق‌تر ترسیب کربن روی زمینی به‌منظور مدیریت بر مبنای کنترل و یا افزایش ترسیب کربن در مقیاس‌های متفاوت رویشگاهی، از معادلات آلومتریک موجود در جنگل‌های شمال کشور استفاده شود.

References

- Aboal, R.J., Arevalo, R.J. and Fernandez, A., 2005. Allometric relationships of different tree species and stand above ground biomass in the Gomeralaurel forest (Canary Islands). Flora, 200: 264-274.
- Ajit, D., Das, K., Chaturvedi, O.P., Jabeen, N. and Dhyani, S.K., 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: 1145-11152.
- Allen, S.E., Grimshaw, H.M. and Rowland, A.P., 1986. Chemical analysis: 285-344. In: Moore, P.D. and Chapman, S.B. (Eds.). Method in Plant Ecology. Blackwell Scientific Press, Oxford, London.
- Anonymous, 2004. West of Haraz Management Project, District 12, Oshtorvash Forests (Second Renewal View). Published by Administration of Natural Resources and Watershed Management of Mazandaran Province, Sari, 327p (In Persian).
- Bergh, J.C.J., Botzen, W.J.M., 2015. Monetary valuation of the social cost of CO_2 emissions: a critical survey. Ecological Economics, 114: 33-46.
- Brown, S., 2002. Measuring carbon in forests: current status and future challenges. Environmental Pollution, 116(3): 363-372.
- 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., Niu, S., 2014. Tree allometry in tropical forest of Congo for carbon stocks estimation in above-ground biomass. Open Journal of Forestry, 4:481-491.
- 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.
- Green, C., Tobin, B., O'Shea, M., Farrell, E.P. and Byrne, K.A., 2007. Above and below ground biomass measurements in an un-thinned stand of Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.). European Journal of Forest Research, 126: 179-188.
- Hayha, T., Franzese, P.P., Paletto, A. and Fath, B.D., 2015. Assessing, valuing, and mapping ecosystem services in Alpine forests. Ecosystem Services, 14:12-23.
- 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.
- 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.
- Kirby, K.R. and Potvin, C., 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.
- 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.

- Machado, J.S., Louzada, J.L., Santos, A.J.A., Nunes, L., Anjos, O., Rodrigues, J., Simões, R.M.S. and Pereira, H., 2014. Variation of wood density and mechanical properties of blackwood (*Acacia melanoxylon* R. Br.). Materials and Design, 56: 975-980.
- Mani, S. and Parthasarathy, N., 2007. Above-ground biomass estimation in ten tropical dry evergreen forest sites of peninsular India. Biomass and Bioenergy, 31: 284-290.
- Marvi-Mohajer, M.R., 2004. Silviculture. University of Tehran Press, Tehran, 387p (In Persian).
- Namiranian, M., 2003. Forest Biometry and Tree Measurement. University of Tehran Press, Tehran, 574p (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.
- Nijnik, M.., Pajot, G., Moffat, A.J. and Slee, B., 2013. An economic analysis of the establishment of forest plantations in the United Kingdom to mitigate climatic change. Forest Policy and Economics, 26: 34-42.
- Parsapour, M.K., Sohrabi, H., Soltani, A. and Iranmanesh, Y., 2012. Allometric equations for estimating biomass in four poplar species at Charmahal and Bakhtiari province. Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 21(3): 517-529 (In Persian).
- Peichl, M. and Arain, M.A., 2006. Above and below ground ecosystem biomass and carbon pools in an age-sequence of temperate pine plantation forests. Agricultural and Forest Meteorology, 140: 51-63.
- Ribeiro, S.C., Fehrmann, L., Pedro Boechat Soares, C., Antônio Gonçalves Jacovine, L., Kleinn, C. and de Oliveira Gaspar, R., 2011. Above and below ground biomass in a Brazilian Cerrado. Forest Ecology and Management, 262: 491-499.
- Sohrabi, H. and Shirvani A., 2011. 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).
- Vahedi, A.A., 2014. Optimal allometric biomass equations for Hornbeam (*Carpinus betulus* L.) boles within the Hyrcanian forest. Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 22(2): 225-236 (In Persian).
- Vahedi, A.A., Mataji, A., Babayi-Kafaki, S., Eshaghi-Rad, J. and Hojati, S.M., 2013. Modeling the bole mass of beech (*Fagus orientalis* Lipsky) through allometric equations within Hyrcanian forests. Iranian Journal of Forest, 5(3): 309-322 (In Persian).
- Vahedi, A.A., Mataji, A., 2014. Amount of carbon sequestration distribution associated with oak tree's (*Quercus castaneifolia* C. A. Mey.) bole in relation to physiographical units of Hyrcanian natural forests of Iran. Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 21(4): 716-728 (In Persian).
- Zhang, Q., Wang, C., Wang, X. and Quan, X., 2009. Carbon concentration variability of 10 Chinese temperate tree species. Forest Ecology and Management, 258: 722-727.
- 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., 2003. Above ground 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.

Comparing the estimated accuracy of destructive and non-destructive methods of aboveground carbon sequestration of velvet maple (*Acer velutinum* Boiss.) in Hyrcanian forests

A.A. Vahedi [1*], K. Salar[2] and A.R. Bijaninejad[3]

1*- Corresponding author, Ph.D. Forestry, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran
Email: ali.vahedi60@gmail.com
2- M.Sc. Forestry, Wood & Paper Industry of Mazandaran, Sari, Iran
3- M.Sc. Forestry, Nowshahr Natural Resources and Watershed Management Office, Nowshahr, Iran

Received: 07.06.2015 Accepted: 14.09.2015

Abstract

Drought and environmental crisis caused by climate change are amongst the most crucial challenges in Iran. Due to the essential importance of absorbing CO2, the most crucial factor of global warming, in forest ecosystems, accurate estimation of carbon sequestration in different parts of the trees is of high significance for forest planning and management under climate change scenarios. In this study, 20 velvet maple (*Acer velutinum* Boiss.) individuals distributed in different diameter classes were initially felled and divided into separate parts of bole and crown. The specific wood density and carbon factor of each fraction and their product were directly calculated and used for non-destructive method to estimate above-ground carbon sequestration (AGC). Allometric equations were developed by weighing of harvested tree parts and measuring each section's drought coefficient. The ANOVA revealed no tree-specific significant difference among carbon factors. However, the specific wood density was significantly different among the each part of tree individuals. Allometric models showed that the highest accuracy of AGC (R^2_{adj} = 0.98, *RMS* = 0.101, *CF* = 1.05) was achieved by the exponential model considered re-conversional equation that included DBH and crown diameter. The result of paired t-test showed that the non-destructive estimation method was associated with the highest uncertainty with the low confidence (S% = 318.4, t = -3.5). However, the result of paired t-test between the observations and predictions of the optimal allometric model here showed that the aforementioned model estimation was confident (S% = 22.6, t = 1.36).

Keywords: Maple, carbon sequestration, specific wood density, allometric equations.