

مدل‌سازی مخزن کربن آلی خاک در رابطه با ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی خاک در جنگل گلندرود در شمال ایران

علی اصغر واحدی¹، اسداله متاجی و سیدمحمد حجتی

دانش آموخته دکتری، گروه جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، دانشگاه آزاد اسلامی علوم و تحقیقات تهران؛ ali.vahedi60@gmail.com

دانشیار گروه جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، دانشگاه آزاد اسلامی علوم و تحقیقات تهران؛ a_mataji2000@yahoo.com

استادیار گروه جنگلداری، دانشگاه منابع طبیعی ساری؛ s_m_hodjati@yahoo.com

دریافت: 92/2/2 و پذیرش: 92/7/22

چکیده

بر آورد هرچه دقیق تر ذخیره کربن آلی خاک در اکوسیستم‌های پیچیده زمین از جمله جنگل‌ها با توجه به اهمیت بسیار روزافزون آن در پی کاهش انتشار کربن، گرمایش زمین و تغییرات اقلیمی، امری مهم و ضروری تلقی می‌گردد. از اینرو تحقیق حاضر با هدف مدل‌سازی مقادیر وزنی ذخیره کربن در سطح حوض کربن آلی خاک در جنگل آمیخته راش واقع در قطعه شاهد سری 3 جنگل گلندرود صورت گرفت. در پروسه مدل‌سازی از روش تجزیه رگرسیون گام به گام استفاده گردید به طوری که کلیه خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در 3 عمق 0-10، 10-30 و 30-50 سانتی متر برای ارائه هر یک از مدل‌های مربوطه مدنظر قرار گرفتند. نتایج حاصل از آزمون تجزیه واریانس یکطرفه (ANOVA) نشان داد که محتوی کلسیم تبدیلی، آهک و رس در سطح ($P < 0.05$) و کربن آلی، ماده آلی، آهک و نیتروژن در سطح ($P < 0.01$) در لایه‌های مختلف خاک دارای اختلاف معنی‌دار می‌باشند. نتایج به دست آمده نشان داد که میانگین مقدار وزنی حوض کربن آلی خاک در منطقه مورد مطالعه $543/87 \pm 22/07 \text{ t C ha}^{-1}$ می‌باشد. نتایج مدل‌سازی حاکی از آن است که در گام اول نسبت C/N به عنوان مهمترین عامل برای پیش‌بینی ارزش وزنی حوض کربن آلی خاک می‌باشد ($R^2_{adj} = 0/44$ ، $SEE = 4/8$). در مراحل بعدی مدل‌سازی، محتوی فسفر، نیتروژن و رس خاک به ترتیب مهمترین عوامل در تعیین پیش‌بینی ذخایر وزنی حوض کربن آلی خاک معرفی گردیدند ($SEE = 3/8 - 2/6$ ، $R^2_{adj} = 0/64$). نسبت C/N، فسفر، نیتروژن و رس به ترتیب 46/3 درصد، 22/41 درصد، 14/71 درصد و 9/44 درصد از سهم تغییرات وزنی حوض کربن آلی خاک را اختصاص دادند. با اضافه شدن هدایت الکتریکی، pH و منیزیم تبدیلی خاک به ترتیب به عنوان متغیرهای مستقل در گام‌های بعدی مدل‌سازی، بهبود قابل توجهی در میزان دقت پیش‌بینی ارزش وزنی حوض کربن آلی خاک در مدل‌های ارائه شده ایجاد نشد ($SEE = 2/5 - 2/3$ ، $R^2_{adj} = 0/84 - 0/87$). در طی پروسه مدل‌سازی نتیجه آنالیز هم‌خطی نیز نشان داد که حداکثر فاکتور تورم واریانس مدل‌های مربوطه ارزش عددی کمتر از 10 داشت ($VIF < 10$) که از این رو دارای ارزش محاسباتی می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: تغییرات اقلیم، رگرسیون گام به گام، حوض کربن آلی خاک، ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی، جنگل‌های آمیخته راش

¹ نویسنده مسئول، آدرس: قائم شهر، جاده نظامی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی

مقدمه

غذایی می‌توان نیتروژن خاک را عامل مهمی به شمار آورد چرا که نیتروژن در ابتدا باعث تحریک پذیری تجزیه لاشیرگ‌های تازه کف جنگل می‌شود و در مراحل عالی از تجزیه و فساد هوموس خاک جلوگیری می‌کند که بدین ترتیب نقش مؤثری می‌تواند در تغییرات ذخایر کربن خاک داشته باشد (جندل، 2007).

به دلیل اینکه تغییرات مکانی کربن آلی خاک در اکوسیستم‌های جنگلی بسیار زیاد می‌باشد و پروسه ذخیره و ترسیب آن در واحد زمان نیز به کندی و به طرق مختلف صورت می‌گیرد اندازه‌گیری کربن خاک و تعیین مقادیر ذخیره آن در اکوسیستم‌های جنگلی بسیار طاقت فرسا، پرهزینه و گاهی غیر ممکن می‌باشد (جندل، 2007؛ نیو و همکاران، 2010). همچنین به دلیل تأثیرپذیری ذخایر کربن خاک جنگل توسط عوامل زیستی (از جمله زیتوده‌های گیاهی و آنزیم‌های میکروارگانیسمی) و غیرزیستی (عوامل فیزیوگرافی و میکروکلیمات) علاوه بر تغییرپذیری زیاد دارای مقادیر مختلف در عمق‌های متفاوت می‌باشند که به نوعی باعث تفاوت قابل ملاحظه در تولیدات جنگلی و چرخه تبدیلی کربن می‌گردند (رودریگز و همکاران، 2008؛ هلینگزورس و همکاران، 2008؛ نیو و همکاران، 2010). بنابراین در اکوسیستم‌های جنگلی علی‌رغم اینکه ساختار بسیار پیچیده‌ای وجود دارد می‌توان تغییرات ویژگی‌های بارز خاک از جمله مقادیر ذخایر کربن را در تیپ‌ها و توده‌های گیاهی که دارای ساختار و ترکیب مشخصی هستند و معرف شرایط و ویژگی‌های بارز رویشگاهی خود هستند مدل سازی کرد و مقادیر به دست آمده را به سطوح مشابه آن تعمیم داد. در رابطه با این موضوع کروتزر و همکاران (1986) اذعان می‌کنند که در جنگل‌هایی که راش (*Fagus sylvatica* L.) عمدتاً گونه غالب می‌باشد به دلیل ریشه دوانی زیاد گونه مذکور، تجمعات کربن در لایه‌های معدنی خاک بیشتر می‌باشد در صورتی که جنگل‌های سوزنی برگ کاج (*Pinus sylvestris* L.) معرف خاک‌های خشک و کم عمق هستند که دارای تجمعات موجودی کربن کمتری هستند (برگرفته از جندل، 2007).

با توجه به مطالب مشروح، هدف مطالعه حاضر مدل سازی مقادیر وزنی میزان کربن ذخیره شده در حوض کربن خاک با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی‌شیمیایی خاک در جنگل‌های آمیخته راش شمال کشور می‌باشد تا بتوان حتی‌الامکان در تحقیقات آتی در این نوع جنگل‌ها به نتایج جامعی دست پیدا کرد.

ذخیره کربن آلی خاک در اکوسیستم‌های جنگلی در افزایش تولیدات زیتوده‌های گیاهی (گیرگال و وانس، 2000) و روند چرخه کربن جهانی دارای نقش بسیار برجسته‌ای می‌باشند (کرسچابوم، 1995). از این رو مطالعه و بررسی تغییرات ذخیره کربن و تعیین عوامل تأثیرگذار بر آن می‌تواند در پیدا کردن راه‌حلهای مناسب و پیش بینی تغییرات مربوط به تولیدات جنگلی و کاهش گازهای گلخانه‌ای از اهمیت زیادی برخوردار باشد (نیو و همکاران، 2010). حوضچه‌های ذخیره کربن آلی خاک¹ شامل عمق‌های مختلف خاک، ریشه چه‌های داخل خاک (معمولاً با ضخامت کمتر از 2 میلی متر)، درصد کربن آلی² و مواد آلی موجود در خاک در انضمام با ویژگی‌های فیزیکی‌شیمیایی خاک³ می‌باشند (پیچل و همکاران، 2006؛ جیمز و همکاران، 2007). مجموع کلیه حوضچه‌های کربن خاک در واحد سطح تحت عنوان حوض کربن خاک⁴ معرفی می‌شود (جیمز، 2007). یکی از مهمترین عوامل که تأثیر بسیار زیادی بر روی تغییرات حوض کربن آلی خاک جنگل دارند ویژگی‌های فیزیکی‌شیمیایی خاک می‌باشند (رودریگز و همکاران، 2008).

ویژگی‌های فیزیکی‌شیمیایی خاک در اکوسیستم‌های جنگلی علاوه بر اینکه تولیدات گیاهی را تحت تأثیر قرار می‌دهند به نوعی هم تحت تأثیر آن قرار می‌گیرند و به همین دلیل می‌توانند در رابطه با بررسی تغییرات ذخایر کربن خاک مورد اهمیت واقع شوند (رودریگز و همکاران، 2008). به عنوان مثال در اکثر مطالعات نشان داده شد که در جنگل‌های پهن برگ که ریشه دوانی درختان تا لایه‌های زیرین خاک زیادتر می‌باشد باعث تجمعات مواد آلی در لایه‌های معدنی خاک می‌شود که بالطبع تأثیر مستقیمی می‌تواند در مقادیر ذخایر کربن داشته باشد (جندل، 2007). گاهی بافت خاک جنگل و ساختار فیزیکی آن نیز می‌تواند بر روی ذخایر کربن خاک تأثیر گذار باشد. خاک‌هایی که شنی هستند و یا لاقط دارای درصد محتوی بالای شن هستند نسبت به خاک‌های دیگر حجم خروجی کربن بیشتری در تبدلات کربن بین خاک و اتمسفر دارند (کارلیل، 1993). البته ناگفته نماند که حجم تبدیلی کربن خاک به سایر ویژگی‌های خاک از جمله درصد رس، pH و عناصر غذایی نیز بستگی دارد (هلینگزورس و همکاران، 2008) که از بین کلیه عناصر

¹ Soil organic carbon sink

² Carbon concentration; Carbon percentage

³ Soil physicochemical properties

⁴ Soil organic carbon pool

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه مورد مطالعه

تحقیق مورد نظر در قطعه شاهد سری 3 جنگل‌های گلندرود نور واقع در حوزه آبخیز 48 جنگل‌های شمال ایران صورت گرفته است. محدوده این رویشگاه معروف به سری سه سرگلند در بین عرض جغرافیایی 36° 27' و 36° 32' 15' و طول جغرافیایی 51° 53' 25'، 51° 57' 25' استقرار دارد. مساحت قطعه مورد مطالعه 38 هکتار است که به عنوان پارسل 3 سری 3 گلندرود نور محسوب می‌گردد. محدوده ارتفاع از سطح دریا در این سری بین 940 تا 1520 متر ارتفاع از سطح دریا می‌باشد که محدوده ارتفاعی قطعه مورد مطالعه 960 تا 1340 متر از سطح دریا می‌باشد. رویشگاه مورد مطالعه از جمله جنگل‌های آمیخته راش می‌باشد که در آن گونه راش (*Fagus orientalis* Lipskey) به صورت آمیخته با بلوط بلندمازو (*Quercus castanifolia* C.A. May)، ممرز (*Carpinus betulus* Lipskey.)، پلت (*Acer velutinum*) و سایر گونه‌های درختی پراکنش دارد (جدول 1). همچنین سنگ مادری آهک- مارن بوده و تیپ خاک نیز قهوه‌ای جنگلی تا راندزین می‌باشد (بی نام، 1387). برای دریافت اطلاعات مربوط به هواشناسی منطقه مورد نظر به طور مستقیم از جدیدترین اطلاعات به دست آمده در نزدیکترین ایستگاه هواشناسی که واقع در شهرستان نوشهر می‌باشد استفاده شد. آمار دریافتی طی 30 سال گذشته نشان داد که میانگین حداکثر و حداقل دما به ترتیب در اواسط مرداد ماه تا اواخر شهریور به میزان 28/8 و در ماه بهمن به میزان 3/9 درجه سانتیگراد می‌باشد. متوسط بارندگی سالیانه 1293/5 میلی‌متر می‌باشد که میانگین حداقل بارندگی در مرداد ماه و میانگین حداکثر بارندگی در اواخر آبان ماه تا اوایل آذر ماه گزارش شده است.

نمونه برداری میدانی

در این تحقیق سطح پلات‌های نمونه‌برداری با توجه به سطح‌نهایی تعیین شده در جنگل‌های معتدله بر اساس منحنی سطح - گونه 400 متر مربع در نظر گرفته شد (بارنز، 1998؛ اسماعیل زاده و حسینی، 1386؛ متاجی و همکاران، 1388). پلات‌های مورد نظر به صورت سیستماتیک با فاصله 100 متر در سطح منطقه مورد مطالعه پیاده شدند تا کلیه تغییرات به صورت ثابت مورد بررسی قرار گیرند (روبیو و همکاران، 2011). سپس در مرکز و چهار گوشه هر پلات پس از کنار زدن کامل لایه لاشبرگی نمونه‌های خاک از عمق‌های مختلف (0-10، 10-30 و 30-50 سانتی متر) برداشت شدند (بارنز و

همکاران، 1998؛ زو و همکاران، 2010). البته برای به حداقل رساندن خطا نمونه‌های مختلف خاک مربوط به هر عمق با یکدیگر مخلوط شده و سپس به آزمایشگاه منتقل شدند.

روش آزمایشگاهی

نمونه‌های خاک قبل از انتقال به داخل محیط آزمایشگاه در هوای آزاد کاملاً خشک گردیده و پس از خرد شدن کامل از الک‌های 2 میلی متری عبور داده شدند. در این میان کلیه ناخالصی‌های خاک اعم از سنگریزه‌ها، خرده‌چوبها و ریشه‌های بزرگتر از 2 میلی متر جدا شدند و کلیه مواد از جمله ریشه‌ها، سنگریزه‌ها و کلیه مواد ریز کمتر از 2 میلی متر جزء آنالیز آزمایشگاهی خاک قرار گرفتند (پیچل و همکاران، 2006).

کلیه خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک برای هر عمق به شرح زیر مورد مطالعه قرار گرفت (روحی مقدم؛ 2008؛ اسحاقی راد و همکاران، 1388؛ ورامش، 1388؛ کوچ و همکاران، 2012).

وزن مخصوص خاک به روش کلوخه بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب، بافت خاک به روش دانسیمتری بایکاس، درصد ازت به روش کج‌دال، درصد کربن آلی به وسیله روش والکی و بلاک، pH گل اشباع شده از آب مقطر به روش پتانسیومتری، هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع و با استفاده از دستگاه هدایت سنخ الکتریکی، درصد ماده آلی به کربن آلی توسط اکسیداسیون دی کرومات پتاسیم ($K_2Cr_2O_7$) روش والکی و بلاک، درصد آهک به روش تیتراسیون، فسفر قابل جذب به روش السن (برحسب ppm)، منیزیم و کلسیم نیز با جذب اتمی (بر حسب میلی اکی والان بر لیتر 1 meq/l) با استفاده از دستگاه اسپکتوفتومتر مورد محاسبه قرار گرفتند.

تجزیه و تحلیل آماری

داده‌های بدست آمده در طی مراحل ذکر شده پس از ورود در نرم افزار SPSS 17.0 توسط آزمون Kolmogorov-Smirnov تحت آزمون نرمالیته قرار گرفتند و همگنی واریانس‌ها با استفاده از آزمون Levene مورد بررسی قرار گرفت. برای مقایسه ویژگی‌های عمق‌های مختلف خاک از آزمون واریانس یکطرفه (ANOVA) استفاده شد و متعاقباً برای مقایسه چند گانه میانگین‌ها از آزمون دانکن استفاده شد.

به منظور تعیین ذخیره کربن آلی خاک از رابطه $[LD] \times [BD] \times [C\%] = SOC_p$ استفاده گردید (پیچل و همکاران، 2006؛ جیمنز و همکاران، 2007؛ کربی و پتوین، 2007) که در این رابطه، SOC_p ، %C، BD و LD به ترتیب وزن حوض کربن آلی خاک بر حسب گرم بر

نشان داد که مقادیر مختلف درصد کربن، درصد ماده آلی، کلسیم، درصد آهک، رس و نیتروژن و نسبت C/N در عمق‌های مختلف خاک دارای اختلاف معنی‌داری می‌باشند (جدول 3 و 4). کلیه ویژگی‌هایی که در عمق‌های مختلف دارای عدم اختلاف معنی‌دار بودند در جدول نشان داده نشده‌اند. میانگین محتوی خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک منطقه مورد مطالعه در جدول 5 نشان داده شده است.

نتایج حاصل از مدل‌سازی مقادیر وزنی ذخیره حوض کربن آلی خاک بر اساس کلیه ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک در تجزیه رگرسیون گام به گام نشان داد که نسبت C/N در درجه اول مهمترین عامل برای پیش بینی وزن ذخیره حوض کربن آلی خاک می‌باشد ($R^2_{adj} = 0/44$, $SEE = 4/5$) (جدول 6). سپس در گام بعدی مدل سازی، فسفر قابل جذب به عنوان دومین عامل پیش-بینی مقادیر ذخیره کربن آلی خاک معرفی گردید که با افزایش این عنصر به عنوان دومین متغیر مستقل دقت مدل به طور معنی‌داری افزایش یافت ($R^2_{adj} = 0/64$, $SEE = 3/8$). دقت مدل‌های ارائه شده با افزوده شدن درصد نیتروژن به عنوان متغیر سوم ($R^2_{adj} = 0/79$, $SEE = 2/9$) و در نهایت با افزودن درصد رس به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت ($R^2_{adj} = 0/83$, $SEE = 2/6$). نتایج به دست آمده در رابطه با تخمین مقادیر وزنی ذخیره کربن توسط هر یک از متغیرهای مذکور در مدل‌های خطی چند متغیره نشان داد که نسبت C/N، فسفر، نیتروژن و رس به ترتیب 46/3 درصد، 22/41 درصد، 14/71 درصد و 9/44 درصد از سهم تغییرات وزنی حوض کربن آلی خاک را اختصاص می‌دهند. در ادامه مدل سازی با افزایش متغیرهای بعدی، دقت مدل‌های مربوطه دارای تغییرات قابل توجهی نمی‌باشد (جدول 6). در آخرین رگرسیون ارائه شده (مدل شماره 7) که به عنوان آخرین مدل تخمین وزنی ذخیره حوض کربن آلی خاک با حداقل انحراف و حداکثر دقت ($R^2_{adj} = 0/87$, $SEE = 2/3$) معرفی می‌شود؛ منیزیوم قابل جذب به عنوان آخرین متغیر مستقل معرفی گردید (جدول 6). کلیه مدل‌های ارائه شده به عنوان مدل‌های خطی چند متغیره³ محسوب می‌گردند که ارائه برازش آنها میسر نمی‌باشد.

نتایج حاصل از آزمون t مربوط به ضرایب ثابت و ضرایب هریک از متغیرهای مستقل در مدل‌های خطی چند متغیره به طور قابل توجهی اختلاف معنی‌داری نشان دادند ($P < 0.01$) که برای محاسبه مورد اعتبار می‌باشند (جدول 6). نتیجه آنالیز هم خطی حداکثر فاکتور تورم

سانتی‌متر مربع (g/cm^2)، درصد کربن خاک، وزن مخصوص ظاهری خاک بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب (g/cm^3) و عمق خاک بر حسب سانتی‌متر (cm) می‌باشد.

برای مدل سازی مقادیر وزنی ذخیره حوض کربن آلی خاک از روش رگرسیون گام به گام استفاده گردید بدین ترتیب که توسط این روش مهمترین ویژگی‌های خاک که بیشترین همبستگی را با مقادیر وزن حوض کربن آلی خاک دارند به ترتیب و به صورت گام به گام وارد مدل رگرسیون مربوطه می‌شوند. هریک از ویژگی‌های دخالت داده شده به عنوان متغیر مستقل به ترتیب اهمیت خود به طور سیستماتیک باعث افزایش دقت مدل می‌شوند. اعتبار سنجی هریک از مدل‌های مربوطه بر اساس ضریب تبیین تطبیق یافته (R^2_{adj}) و حداقل اشتباه معیار برآورد (SEE) مورد بررسی قرار گرفت (باوکر، 1384). برای اطمینان، از آزمون دوربین - واتسن¹ و همچنین از فاکتور تورم واریانس (VIF)² با حداکثر مقدار قابل قبول (کمتر از 10) جهت تأیید دقت مدل‌های بدست آمده استفاده گردید. برای تعیین اعتبار سنجی پارامترهای هریک از مدل‌های رگرسیون از آزمون t استفاده گردید.

نتایج

جدول (1) و (2) ترکیب گونه‌های درختی و علفی و میانگین درصد پوشش هر یک از گونه‌ها را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهند. با توجه به عدم حضور قابل توجه پوشش درختچه‌ای در منطقه مورد مطالعه از ارائه آن خودداری گردید. طبق نتایج جداول مذکور گونه‌های درختی راش، ممرز، پلت و بلندمازو حداکثر پوشش را به خود اختصاص می‌دهند و از بین گونه‌های علفی نیز جگن (کارکس) حداکثر پوشش را نسبت به بقیه گونه‌های گیاهان علفی دارند.

نتایج حاصل از آزمون نرمالیت کولموگروف - اسمیرنوف و آزمون لون به ترتیب نشان داد که توزیع داده‌ها به صورت نرمال و همگن می‌باشد. نتایج آزمون ANOVA نشان داد که بین وزن ذخیره کربن در حوض‌های کربن خاک در لایه‌های مختلف خاک اختلاف معنی‌داری وجود دارد ($F = 37/779$, $P < 0.001$). میانگین ذخیره حوضچه کربن عمق اول، دوم و سوم خاک در منطقه مورد مطالعه به ترتیب^a $188/26 \pm 5/19 t.ha^{-1}$ ، $234/32 \pm 10/4 t.ha^{-1}$ و $121/28 \pm 11/01 t.ha^{-1}$ تن در هکتار می‌باشد. همچنین نتایج مربوط به مقایسه کلیه ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک در عمق‌های مختلف

¹ Durbin-Watson test

² Variance inflation factor

³ Multiple linear regression

واریانس (VIF) مدل‌های مربوطه مقادیر کمتر از 5 را نشان دادند ($VIF < 5$) که مقدار حداکثر آن در نتیجه حاضر 2/26 می‌باشد (جدول 6). علاوه بر آن آزمون دوربین-واتسن نیز با ارزش مقداری 1/97 مورد محاسبه قرار گرفت (جدول 6).

بحث

با توجه به اهمیت میزان ذخیره کربن آلی خاک در اکوسیستم‌های پیچیده زمین از جمله جنگل‌ها و در پی کاهش انتشار کربن، کاهش گرمایش زمین و تغییرات اقلیمی، تعیین برآورد آن با دقت هرچه بیشتر امری بسیار مهم و ضروری تلقی می‌گردد (مک دیکن، 1997). از اینرو برآورد ذخیره کربن آلی در قالب اندازه‌گیری یا برآورد موجودی ذخیره کربن در واحد حجم و یا در قالب اندازه‌گیری یا برآورد وزن ذخیره کربن در واحد سطح صورت می‌پذیرد که به عنوان تعیین ذخیره کربن آلی خاک در حوض کربن (گرم بر سانتی متر مربع یا تن در هکتار) تلقی می‌گردد (جیمنز و همکاران، 2006؛ جیمنز و همکاران، 2007). در تحقیق حاضر از روش دوم استفاده شد طوری که کلیه مقادیر وزنی کربن ذخیره شده در حوضچه‌های کربن خاک (لایه‌های معدنی خاک به همراه ترکیبات آلی و دیگر اجزاء متصل به هر لایه) مد نظر قرار گرفته شدند.

مدل سازی وزن ذخیره کربن آلی خاک در سطح حوض کربن با استفاده از کلیه ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک به عنوان متغیرهای ورودی به صورت گام به گام صورت پذیرفت که بر اساس نتایج به دست آمده نسبت C/N، فسفر قابل جذب، نیتروژن و رس به ترتیب مهمترین عوامل در تعیین پیش بینی ذخایر وزنی حوض کربن خاک معرفی گردیدند. معمولاً افزایش نسبت C/N در منطقه مورد مطالعه می‌تواند نشان دهنده کاهش روند تجزیه مواد آلی و روند معدنی شدن نیتروژن باشد که باعث افزایش ذخیره حوض کربن خاک می‌باشد (سیلور و میا، 2001). البته نسبت C/N به درصد پوشش درختان اشکوب فوقانی، به بافت خاک و آب و هوا نیز بستگی زیادی دارد (میتیمیر و برگ، 1986). واحدی (1391) در پی تأثیرات ترکیب و میزان پوشش گیاهی در میزان ذخیره حوض کربن آلی خاک در جنگل‌های گلندرود به این نتیجه رسید که بین درصد پوشش گونه‌های غالب درختی و ذخیره کربن خاک همبستگی شدید وجود دارد. افزایش درصد پوشش درختان غالب باعث افزایش حجم لاشبرگ‌های کف جنگل شده است. بنابراین با توجه به ترکیب پوششی درختان غالب منطقه؛ کف جنگل اکثراً دارای لاشبرگ‌های سخت و چرمی شکل (لاشبرگ‌های

حاصل از راش و بلوط) می‌باشد که بالطبع نشان دهنده افزایش C/N در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. بسیاری از مطالعات در بازه‌های زمانی بلند مدت به این نتیجه رسیدند که بیشتر کربن حاصل از تجزیه لاشبرگ‌ها و مواد آلی سخت کف جنگل به لایه‌های سطحی و پس از پروسه‌های طولانی تر وارد لایه‌های معدنی خاک شده که متعاقباً باعث افزایش میزان ذخیره کربن خاک در لایه‌های معدنی می‌شوند (جانسون و همکاران، 2002؛ پل و همکاران، 2003؛ دگریز و همکاران، 2004). البته گاهاً افزایش بارندگی و پدیده آبشویی مواد آلی کف جنگل و یا ترکیبات کربن لایه‌های سطحی خاک را به عمق‌های معدنی خاک انتقال می‌دهد (لال، 2005). بنابراین انتقال میزان کربن و ترکیبات آلی از کف جنگل و لایه‌های سطحی خاک به لایه‌های پایین تر خاک به دلایل ذکر شده می‌تواند یکی از عوامل تأثیر گذار در افزایش وزنی ذخیره کربن عمق دوم خاک نسبت به لایه فوقانی خاک باشد.

میزان فسفر در لایه‌های مختلف خاک معمولاً بین 1/5 - 1/00 میلی گرم در گرم دارای تفاوت می‌باشد که البته میزان فسفر مانند نیتروژن در دوره سنتز بیولوژیکی بسیار دارای اهمیت می‌باشد (استفان و همکاران، 1997؛ روحی مقدم و همکاران، 2008). فسفر و نیتروژن یکی از مهمترین عناصر غذایی خاک می‌باشند که در تولید زیتوده‌های گیاهی و افزایش ذخیره کربن در خاک نقش مؤثری دارند. قارچ‌های میکوریزی که همزیستی زیادی با ریشه گیاهان دارند با جذب عناصر غذایی فسفر و نیتروژن فعالیت بیشتری پیدا می‌کنند و باعث نگهداری هرچه بیشتر میزان کربن در میسلیوم خود شده و به این ترتیب باعث افزایش ذخیره کربن در حوضچه‌های کربن خاک و حتی باعث افزایش انحصار و ذخیره کربن در خاکدانه‌ها می‌گردند (لانگلی و همکاران، 2006؛ ریلیگ و مامی، 2006). علی‌رغم این که این عنصر کمتر تحت آبشویی قرار می‌گیرد و همچنین فسفر مورد نیاز گیاهان از خاک‌های زیر سطحی تأمین می‌شود (روحی مقدم و همکاران، 1390) ولی در تحقیق حاضر اختلاف معنی‌داری در میزان فسفر سطح خاک و لایه‌های معدنی زیرین وجود ندارد. البته میزان فسفر در خاک به شرایط جذبی گیاهان و نوع گیاهان و همچنین به وجود فسفر در کانی‌های سنگ‌های متفاوت در لایه‌های زیر سطحی خاک نیز بستگی دارد (روحی مقدم و همکاران، 1390).

معمولاً افزایش درصد رس باعث افزایش چسبندگی ذرات و خاکدانه‌های خاک می‌گردد که در این رابطه به خصوص در خاک‌های با بافت رسی - سیلتی

روحي مقدم و همکاران (1390) عدم تغییر زیاد هدایت الکتریکی (EC) در خاک‌های سطحی را به دلیل بارندگی زیاد و آبشویی در خاک و وجود تغییرات جزئی این ویژگی در عمق‌های خاک را به دلیل رسیدن کاتیون‌ها و آنیون‌های رسیده از فرایند مذکور در خاک می‌باشد.

ورود pH (اسیدیته خاک) و منیزیوم عملاً هیچ تغییر خاصی در مدل بوجود نیامورد ($R^2_{adj} = 0/88 - 0/89$)، با توجه به اینکه در مدل‌های مربوطه آن‌ها حداکثر تورم واریانس 2/79 - 2/26 تغییر یافت. این امر نشان می‌دهد خصوصیات مذکور در خاک مورد مطالعه از حداقل تغییرپذیری برخوردار بوده و علاوه بر همبستگی معکوس کمترین میزان همبستگی را با وزن ذخیره کربن خاک دارند. البته محاسبه اسیدیته خاک منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که pH تقریباً خنثی بوده و خاک کمی گرایش به آهکی بودن دارد. البته میزان آهک خاک در عمق دوم و سوم خاک (جدول 4) می‌تواند به دلیل بارندگی فراوان منطقه و پدیده آبشویی در خاک باشد که احتمالاً آهک از سطح خاک شسته شده و وارد عمق خاک شده است. وفور آهک در اعماق خیلی پایین خاک می‌تواند دلیلی بر کاهش ذخیره کربن خاک نسبت به سایر عمق‌های دیگر و وارونگی ارتباط pH و مقادیر وزنی حوض کربن آلی خاک باشد. منیزیوم به همراه کلسیم یکی از عناصر مهم جذب گیاهان می‌باشند که معمولاً در خاک‌های حاصلخیز در ارتباط با یکدیگر هستند و با یکدیگر همبستگی مثبت دارند (واحدی، 1391). در تحقیق حاضر منیزیوم دارای اختلاف معنی‌داری در عمق‌های معدنی خاک نبوده است ولی میزان کلسیم در عمق‌های پایین به طور معنی‌داری بیشتر بود که این امر هم می‌تواند به دلیل جذب کمتر این عنصر توسط درختان نسبت به منیزیوم باشد و یا می‌تواند به دلیل آبشویی سطح فوقانی خاک باشد که این عدم تعادل در جذب کاتیون‌های تبادلی منیزیوم و کلسیم می‌تواند تأثیر وارونگی بر ذخیره کربن آلی خاک داشته باشند.

موجودی ذخیره کربن در حوض کربن خاک به دلیل کاهش در هدررفت افزایش می‌یابد (دین و همکاران، 2008). جیمز و همکاران (2007) در مطالعه خود در مناطق جنگل کاری شده با گونه‌های درختی بومی در کاریبین کاستاریکا دریافتند که بین افزایش رس و ذخیره کربن خاک رابطه معکوس وجود دارد. در خصوص این نتیجه با بررسی هرچه بیشتر بافت خاک دریافتند که میزان شن موجود در بافت خاک بیش از 80% بود که اندازه ذرات شن خاک در ارتباط با سایر خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک می‌تواند نقش مؤثرتری در هدر رفت کربن آلی و کاهش میزان ذخیره کربن خاک داشته باشد. در تحقیق حاضر مطابق جدول (5) میانگین درصد رس منطقه مورد نظر تقریباً دو برابر میزان شن در خاک می‌باشد. با توجه به درصد سیلت تشکیل دهنده خاک منطقه و این که بافت خاک منطقه مورد مطالعه رسی سیلتی می‌باشد لذا هدر رفت ذخیره کربن آلی در حوضچه‌ها و حوض کربن خاک کمتر می‌باشد. در تحقیق حاضر جدول (4) نشان می‌دهد که درصد رس خاک در عمق دوم نسبت به اعماق دیگر بیشتر است که می‌تواند یکی از دلایل مهم افزایش میزان بیشتر ذخیره کربن آلی در عمق نسبت به سایر عمق‌های دیگر باشد.

در ادامه مدل سازی با اضافه شدن دیگر متغیرهای فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله وزن مخصوص ظاهری، هدایت الکتریکی، pH و منیزیوم قابل جذب به عنوان متغیرهای مستقل در مدل‌های خطی چند متغیره دقت برآورد وزن ذخیره کربن آلی خاک تغییر قابل ملاحظه‌ای پیدا نمی‌کند و شدت روند کاهش اشتباه معیار برآوردی بسیار کند می‌باشد. به طور واضح این امر به دلیل تغییرپذیری بسیار کم این متغیرها در کلیه لایه‌های خاک می‌باشد و از طرفی متغیرهای مذکور دارای همبستگی کمتری با ذخیره وزنی حوض کربن آلی خاک می‌باشند.

جدول 1- ترکیب گونه‌های درختی و میانگین درصد پوشش آن‌ها در منطقه مورد مطالعه

نام علمی گونه‌های درختی	نام فارسی	درصد پوشش (Mean ± SEM)
<i>Acer velutinum</i> Boiss.	افرا پلت	39/37 ± 19/43
<i>Quercus castanefolia</i> C.A. May	بلوط بلندمازو	38/40 ± 11/1
<i>Carpinus betulus</i> L.	ممرز	66/69 ± 12/04
<i>Tilia platyphyllus</i> L.	نمنار	20/48 ± 11/91
<i>Alnus subcordata</i> C.A. May	توسکای بیلاقی	16/34 ± 9/11
<i>Acer cappadocicum</i> Gled.	افرا شیردار	5/05 ± 3/57
<i>Prunus avium</i> L.	گیلاس وحشی	3/39 ± 1/97
<i>Carpinus schuschaensis</i> L.	لور	9/56 ± 5/41
<i>Fagus orientalis</i> L.	راش	76/27 ± 19/72
<i>Sorbus terminalis</i> (L.) Crantz	بارانک	7/49 ± 4/14
<i>Zelkova caprinifolia</i> (Pall.) Dippel	آزاد	14/82 ± 6/42
<i>Parrotia persica</i> (DC.) C. A. May.	انجیلی	17/94 ± 3/96
<i>Fraxinus excelsior</i> L.	زبان گنجشک	14/48 ± 5/32
<i>Diospyros lotus</i> L.	خرمندی	2/58 ± 1/06

جدول 2- ترکیب گونه‌های علفی و میانگین درصد پوشش آن‌ها در منطقه مورد مطالعه

گونه‌های علفی	نام فارسی	درصد پوشش (Mean ± SEM)
<i>Sambucus Ebulus</i> L.	پلهم	8/08 ± 2/5
<i>Cyclamen goum</i> Miller.	سیکلامن	18/59 ± 2/4
<i>Sanicula europaea</i> L.	سانیکول	12/18 ± 3/30
<i>Mentha mozafrariani</i> (L.) Huds	نعناى کوهی	2/5 ± 1/3
<i>Asperula odorata</i> (L.) Scop	آسپرولا	5/08 ± 1/2
<i>Euphorbia amygdaloides</i> L.	فرقیون	12/64 ± 4/4
<i>Laser trilobium</i> L.	کمای جنگلی	2/24 ± 1/05
<i>Pteris cretica</i> L.	سرخس پنجه ای	5/5 ± 2/06
<i>Rubus persicus</i> Boiss.	تمشک	13/40 ± 3/81
<i>Vicia sativa</i> L.	ماش	5/04 ± 1/6
<i>Urtica dioica</i> L.	گزنه	8/08 ± 2/9
<i>Viola odorata</i> L.	بنفشه معطر	14/64 ± 2/7
<i>Erythronium denis-canis</i> L.	علف پیازدار	1/76 ± 0/99
<i>Scilla greilhuberi</i> Speta.	نجم آبی کاسپانی	0/52 ± 0/48
<i>Polygala anatolyca</i> L.	شیرآور آناتولی	7/4 ± 1/9
<i>Ruscus hyrcanus</i> Woron.	کوله خاس	10/20 ± 4/16
<i>Mercurialis perennis</i> L.	علف جیوه	2/72 ± 1/27
<i>Fragaria vesca</i> L.	توت فرنگی	7/69 ± 2/92
<i>Primula heterochroma</i> Stapf.	پامچال	7/13 ± 1/52
<i>Cardamine bolbifera</i> L.	تره تیزک باتلاقی پیازدار	2/44 ± 1/23
<i>Plantago lanceolata</i> L.	بارهنگ سرنیزه ای	2/95 ± 1/26
<i>Galium setaceum</i> L.	شیرینیر	2/41 ± 0/90
<i>Petroselinum sativum</i> Hill.	جعفری	3/12 ± 1/02
<i>Danae racemosa</i> (L.) Moench	همیشک	0/93 ± 0/49
<i>Carex divulsa</i> L.	جگن	4/74 ± 1/77
<i>Carex sylvatica</i> Huds.	جگن	31/46 ± 4/18
<i>Oplismenus undulatifolius</i> P. Beauv.	ملف	4/16 ± 1/59
<i>Ungernia flava</i> L.	گرامینو	8/32 ± 3/08
<i>Ungernia trisfaera</i> L.	گرامینو	5/4 ± 2/3
<i>Pimpinella affinis</i> Ledeb	جعفری کوهی	7/64 ± 3/37
<i>Epimedium pinnatum</i> L.	چلرگ	16/36 ± 2/93
<i>Hedera pastuchovii</i> Worn Ex. Grossh.	دردوست	14/46 ± 3/87

جدول 3- نتایج تجزیه واریانس ویژگی‌های خاک در عمق‌های مختلف

C/N	نیترژن %	رس %	آهک %	کلسیم تبدلی (meq/l)	ماده آلی %	کربن آلی %	
686/29	18/103	3/654	4/11	3/971	197/611	156/952	مقدار F
0/000	0/000	0/032	0/020	0/021	0/000	0/000	محاسباتی مقدار P

جدول 4- نتایج مقایسه میانگین آزمون دانکن مربوط به ویژگی‌های خاک در عمق‌های مختلف خاک

C/N	نیترژن %	رس %	آهک %	کلسیم تبدلی (meq/l)	ماده آلی %	کربن آلی %	
15/61 a	0/082 a	40/80 ab	3/4 b	2/82 b	2/25 a	1/27 a	عمق اول
13/14 b	0/065 b	44/16 a	9/08 a	3/68 ab	1/35 b	0/79 b	عمق دوم
7/78 c	0/055 c	39/24 b	7/96 a	4/71 a	0/67 c	0/41 c	عمق سوم

حروف لاتین مشابه مبین عدم وجود تفاوت معنی‌داری بین عمق‌های مختلف خاک می‌باشد

جدول 5 - میانگین، کمینه و بیشینه کلیه خصوصیات فیزیکی-شیمیایی خاک در منطقه مورد مطالعه

ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک	میانگین ± اشتباه معیار Mean ± SEM	فواصل کمینه و بیشینه Interval
pH اسیدیته	7/30 ± 0/08	6/62-8/21
EC (ds.m ⁻¹) هدایت الکتریکی	0/30 ± 0/021	0/17 - 0/64
C (%) درصد کربن	0/83 ± 0/084	0/28 - 1/43
OM (%) درصد ماده آلی	1/43 ± 0/13	0/48 - 2/55
Lime (%) درصد آهک	6/81 ± 1/24	0/33 - 22
Clay (%) درصد رس	41/40 ± 0/87	33/67 - 48/67
Silt (%) درصد سیلت	36/57 ± 0/85	28/67 - 44
Sand (%) درصد شن	21/66 ± 0/47	17 - 25/67
Gravel (%) درصد سنگریزه	11/066 ± 0/31	8 - 13/67
P (ppm) فسفر قابل جذب	10/44 ± 0/46	7/33 - 14
Ca ²⁺ (meq.l ⁻¹) کلسیم قابل جذب	3/74 ± 0/37	1/11 - 8
Mg ²⁺ (meq.l ⁻¹) منیزیم قابل جذب	0/58 ± 0/060	0/27 - 1/43
N (%) درصد نیترژن	0/067 ± 0/003	0/11 - 0/26
C/N ratio نسبت کربن به نیترژن	12/18 ± 0/82	5/51 - 22/93
Bulk density (g.cm ⁻³) وزن مخصوص ظاهری	1/46 ± 0/012	1/36 - 1/60

جدول 6- نتایج آنالیز رگرسیون گام به گام ذخیره وزنی حوض کربن آلی خاک در منطقه مورد مطالعه

کد مدل	مدل رگرسیون	R ² _{adj}	SEE	F-value	حداکثر VIF
1	Y = 7/25 + 0/893 C/N	0/44	4/8	23/59**	1/001
2	Y = -6/41 + 1/02 C/N + 1/15 P	0/64	3/8	69/51**	1/044
3	Y = -15/87 + 0/99 C/N + 1/26 P + 127/32 N	0/79	2/9	98/34**	1/018
4	Y = -21/9 + 0/96C/N + 1/21P + 114/93N + 0/19 Clay	0/83	2/6	94/92**	1/065
5	Y = -22/19 + 0/92 C/N + 1/24P + 119/05N + 0/16Clay + 4/59EC	0/84	2/5	82/79**	1/026
6	Y = -11/07 + 0/85C/N + 1/39P + 133/8N + 0/15 Clay + 8/44EC - 1/89pH	0/85	2/4	74/88**	1/192
7	Y = -2/25 + 0/76C/N + 1/36P + 137/35N + 0/13 Clay + 12/55 EC - 2/78 pH - 2/57 Mg	0/87	2/3	74/83**	2/126

Y: مقدار وزنی ذخیره حوض کربن آلی خاک (گرم بر سانتی متر مربع)، R²_{adj}: ضریب تبیین تصحیح شده، SEE: اشتباه معیار برآوردی مدل، ** معنی‌داری در سطح (P < 0.001). F-value: F: محاسباتی حاصل از آزمون ANOVA، (کلیه ضرایب در سطح (P < 0.001) معنی‌دار می‌باشند).

VIF: فاکتور تورم واریانس، مقدار حاصل از آزمون دوربین - واتسن (D-W test): 1/97

فهرست منابع:

1. اسحاقی راد، ج.، زاهدی امیری، ق.ا.، مروی مهاجر، م. ر.، متاجی، ا.، 1388. ارتباط بین پوشش‌های رستنی با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در جوامع راش (مطالعه موردی: جنگل آموزشی پژوهشی حیرود کنار نوشهر). فصلنامه جنگل و صنوبر ایران، جلد 17، شماره 2، 174-187.
2. اسماعیل زاده، ا.، حسینی، م.، 1386. رابطه بین گروه‌های اکولوژیک گیاهی با شاخص‌های تنوع زیستی گیاهی در ذخیره گاه سرخدار افراتخته. محیط‌شناسی، سال سی و سوم، شماره 43، صفحه 21-30.
3. باوکر، هزمر، علیرضا جباری، جرالد لیبرمن و هاشم محلوجی، 1384. آمار مهندسی، مرکز نشر دانشگاهی، ص 852.
4. بی نام، 1387. طرح جنگلداری سری سه گلندروود (تجدید نظر دوم)، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان مازندران - نوشهر.
5. روحی مقدم، ع.، حسینی، س.م.، ابراهیمی، ع.، رحمانی، ا.، طبری، م.، مهدوی، ر. 1390. بررسی برخی از ویژگی‌های خاک در جنگل‌کاری‌های خالص و آمیخته بلندمازو. مجله پژوهش‌های خاک، 25 (1): 39-48.
6. متاجی، ا.، زاهدی امیری، ق.ا.، عصری، ی.، 1388. آنالیز پوشش گیاهی بر اساس جوامع و ارتباط آن با شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک در جنگل‌های طبیعی. فصلنامه جنگل و صنوبر ایران، جلد 17، شماره 1، 85-98.
7. واحدی ع.ا.، 1391. ارتباط بین تنوع زیستی گیاهی و میزان ترسیب کربن در جنگل‌های طبیعی شمال ایران (مطالعه موردی جنگل گلندروود نور). رساله دکتری جنگلداری. دانشگاه آزاد اسلامی علوم و تحقیقات تهران، 127 صفحه.
8. ورامش، س.، 1388. مقایسه میزان ترسیب کربن گونه‌های پهن برگ و سوزنی برگ در جنگل شهری (مطالعه موردی: پارک چیتگر تهران). پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس، 132 صفحه.
9. Barnes, B.V., Zak, D.R., Denton, S.R., and Spurr, S.H., 1998. Forest ecology, John Wiley and Sons. INC., 773 pp.
10. Carlyle, J., 1993. Organic carbon in forested sandy soils: properties, processes, and the impact of forest management. *New Zealand Journal Forest Science* 23, 390-402.
11. DeGryze, S., Six, J., Paustian, K., Morris, S.J., Paul, E.A., Merckx, R., 2004. Soil organic carbon pool changes following land-use conversions. *Global Change Biology* 10, 1120-1132.
12. Grigal, D.F., Vance, E.D., 2000. Influence of soil organic matter on forest productivity. *New Zealand Journal of Forestry Science* 30, 169-205.
13. Hollingsworth, T.N., Schuur, E.A.G., Schuur, F.S., Walker, M.D., 2008. Plant Community Composition as a Predictor of Regional Soil Carbon Storage in Alaskan Boreal Black Spruce Ecosystems. *Ecosystems*, DOI: 10.1007/s10021-008-9147-y.
14. Jandl, R., Lindner, M., Vesterdal, L., Bauwens, B., Baritz, R., Hagedorn, F., Johnson, D.W., Minkinen, K., Byrne, K.A., 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma*, 137, 253-268.
15. Jimenez, J.J., Lal, R., 2006. Mechanisms of C sequestration in soils of Latin America. *Crit. Rev. Plant Sci.* 25, 337-365.
16. Jimenez, J.J., Lal, R., Leblanc, H.A., Russo, R.O., 2007. Soil organic carbon pool under native tree plantations in the Caribbean lowlands of Costa Rica, *Forest Ecology and Management*, 241, 134-144.
17. Johnson, D., Knoepp, J., Swank, W., Shan, J., Morris, L., van Lear, D., Kapeluck, P., 2002. Effects of forest management on soil carbon: results of some long-term resampling studies. *Environmental Pollution* 116, 201-208.
18. Kirby, K.R & 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.

19. Kirschbaum, M.U.F., 1995. The temperature-dependence of soil organic-matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic-C storage. *Soil Biology & Biochemistry* 27, 753–760.
20. Kooch, Y., Hosseini, S.M., Zaccane, C., Jalilvand, H., Hojjati, S.M., 2012. Soil organic carbon sequestration as affected by afforestation: the Darab Kola forest (north of Iran) case study. *Journal of Environmental Monitoring*
21. Lal, R., 2005. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management* 220, 242–258.
22. Langley, J.A., Chapman, S.K. & Hungate, B.A. (2006). Ectomycorrhizal colonization slows root decomposition: the postmortem fungal legacy. *Ecol. Lett.*, 9, 955–959.
23. MacDicken, K.G., 1997. A guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects . Winrock International Institute for Agricultural Development, Forest Carbon Monitoring Program. PP; 91.
24. Meentemeyer, V., Berg, B., 1986. Regional variation in rate of mass loss of *Pinus sylvestris* needle litter in Swedish pine forests as influenced by climate and litter quality. *Scand. J. For. Res.* (1), 167–180.
25. Nave, L.E., Vance, E.D., Swanston, C.W., Curtis, P.S., 2010. Harvest impacts on soil carbon storage in temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 259, 857–866.
26. Paul, K.I., Polglase, P.J., Richards, G.P., 2003. Predicted change in soil carbon following afforestation or reforestation, and analysis of controlling factors by linking a c accounting model (CAMFor) to models of forest growth (3PG), litter decomposition (GENDEC) and soil C turnover (RothC). *Forest Ecology and Management* 177, 485–501.
27. Peichl, M. & 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.
28. Rillig, M.C. & Mummey, D.L. (2006). Mycorrhizas and soil structure. *New Phytol.*, 171, 41–53.
29. Rodriguez-Loinaz, G., Onaindia, M., Amezcaga, I., Mijangos, I., Garbisu, C., 2008. Relationship between vegetation diversity and soil functional diversity in native mixed-oak forests. *Soil Biology & Biochemistry*, 40, 49–60.
30. Rouhi-Moghaddam, E., Hosseini, S.M., Ebrahimi, E., Tabari, M., Rahmani, A., 2008. Comparison of growth, nutrition and soil properties of pure stands of *Quercus castaneifolia* and mixed with *Zelkova carpinifolia* in the Hyrcanian forests of Iran. *Forest Ecology and Management*, 255, 1149–1160
31. Rubio, A., Gavilán, R.G., Montes, F., Gutiérrez-Girón, A., Daz-Pines, E., T & E., Mezquida, 2011. Biodiversity measures applied to stand-level management: Can they really be useful? *Ecological Indicators* 11 (2011) 545–556.
32. Silver, W.L. & Miya, R.K. (2001). Global patterns in root decomposition: comparisons of climate and litter quality effects. *Oecologia*, 129, 407–419.
33. Stefan, K., Frust, A., Hacker, R., Bartels, U., 1997. Forest foliar condition in Europe. Technical Report. EC and UN/ECE, Brussels, Geneva, p. 207.
34. Zhu, B., Wang, X., Fang, W., Piao, S., Shen, H., Zhao, S & C., Peng, 2010. Altitudinal changes in carbon storage of temperate forests on Mt Changbai, Northeast China. *J Plant Res.* 123:439–452.