

## مدل‌سازی ترسیب کربن آلی خاک در ارتباط با تنوع زیستی گیاهی در جنگل‌های طبیعی آمیخته راش

علی اصغر واحدی<sup>\*۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۸/۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۹/۲۴)

### چکیده

جنگل‌های طبیعی آمیخته راش با غنی‌ترین تنوع زیستی گیاهی دارای ذخایر کلان کربن آلی در عمق‌های مختلف خاک می‌باشند. هدف تحقیق حاضر مدل‌سازی ترسیب کربن خاک در جنگل‌های مذکور برحسب شاخص‌های تنوع زیستی برای مدیریت بهینه تغییرات مخازن کربن خاک در رابطه با روند پایداری، حاصلخیزی، چرخه کربن و برنامه‌ریزی برای رویارویی با تغییرات آب و هوایی در سطح محلی یا منطقه‌ای می‌باشد. پس از انجام عملیات میدانی برای اندازه‌گیری و محاسبه شاخص‌های تنوع زیستی و فاکتور کربن خاک از تحلیل رگرسیون خطی ساده، رگرسیون خطی چندگانه و رگرسیون به‌روش تخمین منحنی برای فرآیند مدل‌سازی استفاده شد. نتایج تحلیل رگرسیون مبتنی بر ضریب تبیین، اشتباه معیار تخمین و ضریب اطلاعات آکاییک (AIC) نشان داد تحلیل رگرسیون خطی ساده و چندگانه دارای دقت برآوردی قابل ملاحظه‌ای نبودند ( $AIC_{min} = +151/74$ ). بر مبنای تحلیل مدل‌های غیرخطی، مدل منحنی (S) شامل غلبه گونه‌ای پوشش علفی به‌عنوان بهترین پیشگو با حداقل خطای تخمینی و حداکثر قطعیت ( $AIC_{min} = -171/23$ ) برای برآورد ذخایر کربن آلی خاک در جنگل مورد مطالعه محسوب شد. در ادامه مدل‌سازی نتایج نشان داد، مدل‌های تبدیلی چندگانه حاصل از تبدیل لگاریتم مدل‌های پایه با افزایش تعداد پارامتر اگرچه دارای اعتبار محاسباتی بودند ( $VIF < 10$ ) ولی دقت برآورد کمتری نسبت به مدل بهینه مذکور داشتند.

واژه‌های کلیدی: جنگل‌های هیرکانی، مدل خطی چندگانه، مدل‌های غیرخطی، ذخایر کربن آلی، تحلیل رگرسیون

۱. مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ali.vahedi60@gmail.com

## مقدمه

ذخایر کربن در خاک با مقداری بیش از سه برابر میزان آن در زی‌توده گیاهی و جانوری، حدود ۷۵ درصد از مقادیر ترسیب شده کربن در خشکی‌های زمین را شامل می‌شود (۱۳). پار و سولیوان (۲۹) گزارش دادند که کربن آلی خاک در اکوسیستم‌های خشکی مهمترین جزء چرخه جهانی کربن محسوب می‌شود که در رابطه با کنترل چالش‌های مربوط به گرمایش زمین نقش عمده‌ای ایفا می‌کند. بدیهی است که مقادیر وزنی کربن ترسیب شده خاک در اکوسیستم‌های طبیعی جنگل به‌عنوان بزرگترین مخازن کربن آلی در میان کلیه اکوسیستم‌های خشکی زمین محسوب می‌شود. در این رابطه، بیشترین تجمعات ذخایر کربن آلی در لایه‌های سطحی خاک (تا عمق ۳۰ سانتی‌متر) انباشته می‌شود (۲۳). با توجه به اینکه ذخایر کربن آلی خاک در واقع یکی از مهمترین شاخص‌های پایداری و اکولوژیکی در اکوسیستم‌های طبیعی محسوب شده، اندازه‌گیری و یا برآورد واقعی مقادیر آن می‌تواند راهکار مناسب در جهت بهبود مدیریت اکوسیستم‌های مذکور و رویارویی با بحران تغییرات اقلیم معرفی شود. از آنجایی که در جنگل‌های طبیعی عناصر گیاهی به‌عنوان اصلی‌ترین جزء اکوسیستم می‌باشند، از اینرو ویژگی‌های آنها تأثیرات عمده و نقش مستقیمی در رابطه با خصوصیات فیزیکی- شیمیایی خاک از جمله ترسیب کربن دارند. یکی از مهمترین ویژگی‌های مذکور، تنوع زیستی گیاهی می‌باشد. جیمز و همکاران (۲۶) گزارش دادند که در واقع تنوع زیستی گیاهی می‌تواند یکی از عامل‌های تأثیرگذار بر میزان ذخایر کربن آلی خاک محسوب شود. در این رابطه می‌توان به مطالعه جندل و همکاران (۲۵) و هلینگزورث و همکاران (۲۱) اشاره کرد که افزودند تنوع زیستی گیاهی در قالب‌های مختلف پوشش گیاهی در اشکوب‌های مختلف یکی از مهمترین عوامل تعیین کننده تغییرات ترسیب کربن آلی خاک به‌شمار می‌روند. فهیم و همکاران (۱۲) نیز در رابطه با تأثیر نوع پوشش جنگلی بر ذخایر کربن آلی خاک

نتیجه‌گیری کردند که مقادیر ترسیب کربن در توده‌هایی با آمیختگی و تیپ‌های مختلف دارای تفاوت معنی‌داری هستند. البته محمودی طالقانی و همکاران (۱۳) نیز در مطالعه‌ای مربوط به مقادیر وزنی ترسیب کربن در جنگل‌های آمیخته راش و در توده‌هایی با تیپ‌های مختلف اذعان کردند که تنوع در ترکیب و آمیختگی پوشش گیاهی باعث افزایش ظرفیت ذخایر کربن آلی خاک می‌شود.

آنچه که امروزه اهمیت آن بیش از پیش نمایان می‌شود نحوه استفاده از شاخص‌های عامل و تعیین کننده مقادیر ترسیب کربن خاک در اکوسیستم‌های جنگلی برای پایش بهینه آن می‌باشد. واضح است که روابط پیچیده‌ای بین روند بیولوژیکی، ظرفیت عناصر غذایی و خصوصیات فیزیکی- شیمیایی خاک و تغییرات تنوع زیستی زی‌توده گیاهی وجود دارد. لیکن، در این زمینه تحلیل جامع و اساسی در قالب یک الگو یا مدل وجود ندارد تا براساس آن تغییرات مقادیر وزنی ترسیب کربن خاک با توجه به متغیرهای عامل از جمله شاخص‌های تنوع زیستی پیش‌بینی و رصد شود. از اینرو، ارائه یک طرح جامع یا مدل بر مبنای تحلیلی یا محاسباتی برای پایش بهینه مقادیر ترسیب کربن و بررسی روند تغییرات آن در بازه‌های زمانی متفاوت با سرعت بیشتر، صرف زمان کمتر، سهولت زیاد و هزینه خیلی کم باید میسر شود (۳۱). در رابطه با ارائه مدل‌های مختلف تحلیل رگرسیون برای پیش‌بینی ذخایر کربن آلی خاک می‌توان به مطالعه علی‌جانپور شلمانی و همکاران (۹)، غلامعلی‌زاده آهنگر و همکاران (۱۰)، مقیمی و همکاران (۱۵)، واحدی و همکاران (۱۷)، اینگل‌بای و کورو (۲۲) اشاره کرد. در تمام مطالعات مذکور برای تحلیل محاسباتی از رگرسیون خطی چندگانه با استفاده از متغیرهای فیزیکی زمین از جمله عوامل توپوگرافی و خصوصیات فیزیکی- شیمیایی خاک استفاده شد. هلینگزورث و همکاران (۲۱) نیز برای به حداکثر رساندن دقت مدل برآوردی ذخایر کربن آلی خاک علاوه بر کمیت‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از شاخص‌های تنوع زیستی گیاهی در قالب

۱۳۴۰ متر ارتفاع از سطح دریا می‌باشد. در رویشگاه جنگلی مورد مطالعه درختان گونه راش به صورت آمیخته با گونه‌هایی مانند پلت، مرمرز، بلوط، نمدار و غیره پراکنش دارد. تیپ خاک در منطقه قهوه‌ای جنگلی تا راندزین و بافت آن لوم رسی سیلتی می‌باشد (۷). به استناد آمار دریافتی از ایستگاه هواشناسی نوشهر، میانگین حداکثر و حداقل دما به ترتیب در اواسط مرداد ماه تا اواخر شهریور ۲۸/۸ و در ماه بهمن ۳/۹ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. متوسط بارندگی سالیانه ۱۲۹۳/۵ میلی‌متر می‌باشد که میانگین حداقل بارندگی در مرداد ماه و میانگین حداکثر بارندگی در اواخر آبان ماه تا اوایل آذر ماه گزارش شده است.

### روش پژوهش

در سطح قطعه مورد مطالعه پلات‌ها به‌طور سیستماتیک با فاصله ۱۰۰ متر از یکدیگر جانمایی شدند تا کلیه تغییرات به‌طور ثابت مورد بررسی قرار گیرند. سطح پلات برای اندازه‌گیری مقادیر پوشش درختی ۴۰۰ مترمربع و برای پوشش علفی ریز پلات‌های ۱ مترمربع در نظر گرفته شد (۲ و ۱۴). برای افزایش دقت نمونه‌برداری ریزپلات‌های مذکور در مرکز و چهار گوشه هر قطعه نمونه پیاده شدند. در سطح هر پلات، کلیه ویژگی‌های کمی درختان شامل قطر برابر سینه، ارتفاع کل و قطر تاج به‌روش عینی اندازه‌گیری شدند (۲ و ۱۴). اندازه‌گیری پوشش علفی به‌روش ذهنی در هر ریز پلات صورت گرفت (۲ و ۱۴). به دلیل پوشش بسیار ناچیز اشکوب درختچه‌ای از مقادیر کمی آن برای محاسبات شاخص‌های تنوع زیستی صرف‌نظر شد.

برای انجام نمونه‌برداری خاک در مرکز هر ریزپلات با استفاده از اوگر سه لایه ۱۰ - ۰ و ۳۰ - ۱۰ و ۵۰ - ۳۰ سانتی‌متری حفر شده و نمونه‌های خاک از هر عمق به‌صورت ترکیبی برداشت شده و سپس به آزمایشگاه منتقل شدند (۱۳ و ۱۷). نمونه‌ها در هوای آزاد کاملاً خشک شده و پس از خشک شدن از الک‌های ۲ میلی‌متری عبور داده شده‌اند. در این میان

رگرسیون چند متغیره استفاده کردند. کلیه مدل‌های ارائه شده مختص هر یک از مناطق مطالعاتی بوده و کاربرد آنها در تمام رویشگاه‌های مطالعاتی امکان‌پذیر است.

اندازه‌گیری شاخص‌های تنوع زیستی نسبت به پارامترهای فیزیکی زمین بسیار آسان‌تر، کم هزینه و برای سطح وسیعی از عرصه‌های جنگلی کاربردی است. از اینرو، آنچه که در پژوهش حاضر برجسته شده است توسعه مدل‌سازی بر مبنای تحلیل‌های خطی و غیرخطی رگرسیون با استفاده از شاخص‌های مذکور برای رسیدن به حداکثر دقت برآوردی مقادیر واقعی ذخایر کربن آلی خاک می‌باشد. جنگل‌های طبیعی آمیخته راش در منطقه هیرکانی واقع در شمال ایران یکی از غنی‌ترین جنگل‌ها، دارای تنوع زیستی بالا، میزان تولید زیاد زی‌توده و با حداکثر حاصلخیزی خاک معرفی شده است (۲۴). از طرفی حداکثر تجمعات کربن آلی و میزان کل ذخایر کربن خاک جنگل‌های مذکور تا عمق ۵۰ سانتی‌متری لایه‌های معدنی خاک دارای مقدار قابل توجهی است (۱۳، ۱۷ و ۲۴). از اینرو، با ارائه مدل‌های بهینه با حداکثر دقت برآورد می‌توان سهم واقعی ذخایر وزنی مخازن کربن آلی خاک در این جنگل‌ها را در رابطه با مدیریت بهینه کیفیت حاصلخیزی خاک و عدم انتشار کربن اتمسفری در مقیاس وسیع (محلی، منطقه‌ای و ملی) با دارا بودن شرایط رویشگاهی و تنوع زیستی مشابه، مشخص نمود.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد مطالعه

مطالعه حاضر در پارسل شماره ۳ سری سه جنگل‌های گلندرود نور واقع در حوزه آبخیز ۴۸ جنگل‌های شمال ایران صورت گرفت. پارسل هدف به‌عنوان قطعه شاهد در سری مذکور محسوب شده که تحت شرایط حفاظتی قرار دارد. منطقه مورد مطالعه در بین عرض جغرافیایی "۳۶° ۲۷' ۳۰" تا "۳۶° ۳۲' ۱۵" و طول جغرافیایی "۵۱° ۵۳' ۲۵" تا "۵۱° ۵۷' ۵۱" استقرار دارد. مساحت قطعه ۳۸ هکتار است و محدوده ارتفاعی آن ۹۶۰ تا

آمده در رابطه فوق استفاده شد.

در تحقیق حاضر تنوع زیستی گیاهی بر مبنای رایج‌ترین شاخص‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. شاخص‌های کاربردی در این پژوهش عبارتند از:

- تنوع شانون وینر  $H'$  (۵ و ۱۳)؛

- شاخص غنای گونه‌ای  $R$  (۲ و ۱۴)؛

- یکنواختی پایلو  $J'$  (۲ و ۱۴)؛

- غلبه گونه‌ای  $D$  (۲ و ۱۴).

نرمال بودن مشاهدات با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و همگنی داده‌ها با استفاده از آزمون لون مورد بررسی قرار گرفت. همبستگی بین ذخایر کربن آلی خاک و شاخص‌های تنوع زیستی با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون تعیین شد.

در پژوهش حاضر برای مدل‌سازی ذخایر وزنی کربن آلی خاک در جنگل مورد مطالعه از تحلیل‌های محاسباتی مبتنی بر رگرسیون به روش تخمین منحنی و رگرسیون خطی چندگانه استفاده شد. در روش رگرسیون تخمین منحنی بر مبنای حداقل مربعات کلیه مدل‌های پایه (مدل توانی، نمایی، گومپرتز، مرکب و غیره) مورد آزمون قرار گرفتند. اساس برآزش کلیه مدل‌ها به صورت غیرخطی می‌باشد که الگوی برآزش آنها به صورت زیر می‌باشد (۳).

$$Y_n = f(x_n, \theta) + Z_n \quad [2]$$

در این رابطه  $f$  مدل رگرسیون و  $x_n$  برداری شامل متغیرهای مستقل برای حالت  $n$  ام است. در تحلیل رگرسیون خطی در واقع برآورد و استنباط نتایج پارامترهای  $\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n]^T$  را در الگوی زیر فراهم می‌کند (۳).

$$Y_n = \beta_1 x_{n1} + \beta_2 x_{n2} + \dots + \beta_p x_{np} + Z_n \rightarrow (x_{n1}, \dots, x_{np})\beta + Z_n \quad [3]$$

در این الگو،  $Z_n$ : متغیر تصادفی و  $Y_n$ : نشان‌دهنده متغیر پاسخ مدل در حالت  $n$  ام می‌باشد که البته از دو قسمت قطعی و خطا تشکیل شده است که میزان خطای آن نیز باید مدنظر قرار گرفته شود. برای تعیین اعتبار محاسباتی مدل‌های چند متغیره بر مبنای

کلیه ناخالصی‌های خاک از جمله سنگریزه‌ها، خرده چوب‌ها و ریشه‌های بزرگتر از ۲ میلی‌متر جدا شدند و کلیه مواد با قطر کمتر از ۲ میلی‌متر (ریشه‌ها، سنگریزه‌ها و کلیه مواد ریز) جزء آنالیز آزمایشگاهی خاک قرار گرفتند (۳۰). کلیه مواد بزرگتر از ۲ میلی‌متر (سنگریزه‌های باقی‌مانده در روی الک) نیز در یک واحد حجمی ثابت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد آون قرار گرفته و پس از خشک شدن با ترازوی دیجیتالی توزین شدند (۳۴). در روش‌های آزمایشگاهی برای محاسبه وزن مخصوص خاک به روش کلوخه برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب و برای تعیین درصد کربن آلی از روش والکی و بلاک استفاده شد.

### تجزیه و تحلیل داده‌ها

به منظور محاسبه ذخایر وزنی مخازن کربن آلی خاک (Soil Organic Carbon) در جنگل مورد مطالعه، از رابطه ۱ استفاده شد (۳۴):

$$SOC = \sum_{i=1}^{n-3} C_i \times D_i \times (\rho_i - R_i) = [C_1 \times D_1 \times (\rho_1 - R_1)]_{AI} + [(C_2 \times D_2 \times (\rho_2 - R_2)]_{B_1} + [(C_3 \times D_3 \times (\rho_3 - R_3)]_{B_2} \quad [1]$$

$C_i$ : درصد کربن آلی مربوط به هر لایه خاک،  $D_i$ : ضخامت هر یک از لایه‌های خاک برحسب سانتی‌متر،  $P_i$  و  $R_i$ : به ترتیب وزن مخصوص ظاهری خاک و سنگریزه‌های (و ریز چوب‌های) بیش از ۲ میلی‌متر در مقیاس ثابت ۱۰۰ گرم در سانتی‌متر مکعب هستند.  $AI$ : مقادیر ترسیب کربن در لایه آلی خاک (۱۰-۰ سانتی‌متر)،  $B_1$ : مقادیر ترسیب کربن در اولین لایه معدنی خاک (۳۰-۱۰ سانتی‌متر) و  $B_2$ : مقادیر ترسیب کربن محاسبه شده در دومین لایه معدنی خاک (۵۰-۳۰ سانتی‌متر) می‌باشد. در واقع SOC موجودی وزنی کربن آلی ترسیب شده در خاک می‌باشد که از مجموع مقادیر وزنی ترسیب کربن هر لایه حاصل می‌شود و برحسب تن در هکتار برآورد می‌شود. با توجه به اینکه ضریب کربن خاک به‌طور مستقیم اندازه‌گیری شد، به جای استفاده از حاصل ضرب شاخص بملن (Bemmlen Index) و ماده آلی خاک از ضریب کربن به‌دست

آزمون مذکور نشان داد که بین مقادیر مذکور و غنای پوشش علفی نیز همبستگی معنی‌داری وجود ندارد (جدول ۱). مطابق جدول ۱ همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر ترسیب کربن با شاخص‌های تنوع شانون و وینر، غلبه گونه‌ای و یکنواختی پایلو به‌طور معنی‌دار همبسته است. البته بین غلبه گونه‌ای پوشش علفی و ذخایر کربن خاک همبستگی معکوس وجود دارد (جدول ۱).

جدول ۲ نتایج مدلسازی ذخایر وزنی ترسیب کربن جنگل‌های آمیخته راش مورد مطالعه را بر مبنای تحلیل رگرسیون خطی چندگانه برحسب کلیه شاخص‌های تنوع زیستی همبسته نشان می‌دهد. نتایج حاصل از مدلسازی براساس کلیه شاخص‌های اعتبارسنجی نشان داد که در بین کلیه مدل‌های چندگانه، مدل خطی ساده برحسب عامل حاصل‌ضرب مربع شاخص شانون و یکنواختی دارای دقت برآورد بیشتر و برازش بهینه نسبت به کلیه مدل‌های چندگانه می‌باشد (جدول ۲). هم‌چنین نتایج نشان داد که با توسعه مدلسازی و افزایش تعداد پارامتر، دقت برآورد افزایش پیدا نکرده است (جدول ۲). همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود مدل ۴ با بیشترین پارامتر محاسباتی بر مبنای تورم واریانس ( $VIF \approx 13$ ) دارای اعتبار محاسباتی نیست.

نتایج حاصل از مدلسازی ترسیب کربن خاک براساس تحلیل رگرسیون غیرخطی یا تخمین منحنی برحسب یک متغیر عامل نشان داد که در واقع مدل کرو (منحنی S) شامل غلبه گونه‌ای پوشش علفی (مدل ۱۲) دارای حداکثر دقت برآورد نسبت به سایر مدل‌های ارائه شده می‌باشد (جدول ۳). در این میان مطابق جدول ۳ مدل‌های توانی و نمایی به ترتیب شامل شاخص غلبه گونه‌ای و تنوع شانون دارای دقت برآورد قابل ملاحظه‌ای بودند ( $AIC = -169/17$ ،  $SEE = 0/15$ ،  $Adj.R^2 = 0/27$ ) ولی نسبت به مدل S برحسب غلبه گونه‌ای پوشش علفی دقت کمتری داشتند. مدل‌های ارائه شده برحسب شاخص یکنواختی نیز دارای اعتبار محاسباتی و برازش برآوردی بودند ولی چون دقت قابل ملاحظه‌ای

تحلیل رگرسیون خطی چندگانه از آزمون هم‌خطی چندگانه برای تعیین فاکتور تورم واریانس ( $VIF < 10$ ) استفاده شد (۴). برای انتخاب بهترین مدل با بیشترین قطعیت و دقت برآوردی برای تحلیل محاسباتی مذکور از مقادیر عددی شاخص‌هایی مانند میانگین مربعات باقی‌مانده‌ها (RMS)، اشتباه معیار تخمین (SEE)، ضریب تبیین تعدیل یافته ( $Adj.R^2$ ) و ضریب اطلاعات آکاییک استفاده شد. با توجه به تعداد مشاهدات و حداقل تعداد پارامترهای مدل‌های تحلیلی - محاسباتی برای محاسبه ضریب تبیین تعدیل یافته و ضریب اطلاعات آکاییک (AIC) از روابط زیر استفاده شد (۱۸):

$$Adj.R^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-p-1} \quad [4]$$

$$AIC = n \ln\left(\frac{RSS}{n}\right) + 2k + \left[ 2k \left( \frac{k+1}{n-k-1} \right) \right] \quad [5]$$

در رابطه فوق،  $P$  تعداد پارامترهای مدل،  $AIC$ : ضریب اطلاعات آکاییک،  $n$ : تعداد مشاهدات،  $RSS$ : مجموع مربعات باقی‌مانده‌ها و  $k$ : تعداد پارامترهای مدل محاسباتی می‌باشد (۱۸). برای افزایش پارامترهای محاسباتی و عوامل توصیفی در مدل‌های غیرخطی برای افزایش هر چه بیشتر دقت برآورد مقادیر وزنی ترسیب کربن آلی خاک، کلیه مدل‌های غیرخطی با تبدیل لگاریتم طبیعی بر مبنای تحلیل رگرسیون خطی چندگانه قابلیت محاسباتی دارند. ولی برای حذف خطای سیستماتیک ناشی از بازتبدیل کلیه مدل‌های تبدیل شده لگاریتمی از فاکتور تصحیح طبق رابطه زیر استفاده شد:

$$CF = \exp\left(\frac{SEE^2}{2}\right) \rightarrow CF = a \in n \leftrightarrow n = \{1, 2, 3, \dots, k\} \rightarrow a \geq 1 \quad [6]$$

## نتایج

نتایج آزمون همبستگی پیرسون نشان داد که بین کلیه شاخص‌های تنوع زیستی پوشش درختی و کل مقادیر وزنی کربن ترسیب شده تا عمق مورد مطالعه (۵۰-۰ سانتی‌متری) ارتباط معنی‌داری وجود ندارد (جدول ۱). هم‌چنین نتایج

جدول ۱. همبستگی بین شاخص‌های تنوع زیستی گیاهی و ذخایر وزنی کربن خاک (۵۰-۰ سانتی‌متر)

J'	D	R	H'	
۰/۱۷ <sup>ns</sup>	۰/۱۳ <sup>ns</sup>	۰/۰۶ <sup>ns</sup>	۰/۱۳ <sup>ns</sup>	تنوع زیستی پوشش درختی - ذخایر کربن خاک
۰/۴۴*	-۰/۴۷*	۰/۲۱ <sup>ns</sup>	۰/۵۲**	تنوع زیستی پوشش علفی - ذخایر کربن خاک

H': تنوع شانون-وینر، R: غنای گونه‌ای، D: غلبه گونه‌ای، J': شاخص یکنواختی پایلو، ns: عدم معنی‌داری در سطح  $P < ۰/۰۵$ ، \* معنی‌داری در سطح  $P < ۰/۰۵$ ، \*\* معنی‌داری در سطح  $P < ۰/۰۱$  می‌باشد.

جدول ۲. نتایج مدل‌سازی بر مبنای تحلیل رگرسیون خطی چندگانه بر حسب شاخص‌های تنوع زیستی

کد	مدل‌های رگرسیون	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$R^2$	$R^2_{Adj}$	RMS	SEE	VIF	AIC
۱	$Y = b_0 + b_1(H')$	۲۶/۴۷	۲۷۱/۲۸	-	-	۰/۲۷۲	۰/۲۴۱	۹۲۵۸/۹	۹۶/۲۲	-	۱۵۲/۴۱
۲	$Y = b_0 + b_1(H') + b_2(J')$	-۶/۰۰۵	۲۳۲/۹۴	۱۳۰/۵۷	-	۰/۲۷۶	۰/۲۱۱	۹۶۲۷/۳۶	۹۸/۱۱	۲/۳۷	۱۵۵/۹۷
۳	$Y = b_0 + b_1(H') + b_2(D)$	۱۱۱/۸۱	۲۳۸/۲۶	-۱۰۶/۸۶	-	۰/۲۷۳	۰/۲۰۷	۹۶۶۸/۱۷	۹۸/۳۲	۵/۶۲	۱۵۶/۰۸
۴	$Y = b_0 + b_1(H') + b_2(D) + b_3(J')$	-۱۳۵/۳۴	۲۵۹/۰۶	۱۴۲/۸۲	۱۹۱/۹۵	۰/۲۷۷	۰/۱۷۳	۱۰۰۷۶/۲	۱۰۰/۳	۱۲/۷۴	۱۵۹/۹۷
۵	$Y = b_0 + b_1(H''J')$	۳۳۷/۱۵	۶۸/۳۴	-	-	۰/۲۹۱	۰/۲۶۱	۹۰۱۷/۷	۹۴/۹۳	-	۱۵۱/۷۴
۶	$Y = b_0 + b_1(H''J') + b_2(D)$	۲۹۰/۵۳	۷۶/۴۳	۱۰۵/۹۱	-	۰/۲۹۲	۰/۲۲۷	۹۴۱۷/۷۷	۹۷/۰۴	۶/۴۷	۱۵۵/۴۲

Y: ترسیب کربن بر حسب تن در هکتار،  $R^2$ : ضریب تبیین،  $R^2_{Adj}$ : ضریب تبیین تعدیل یافته، RMS: میانگین مربعات باقی‌مانده‌ها، SEE: اشتباه معیار تخمین، VIF: فاکتور تورم واریانس، AIC: ضریب اطلاعات آکاییک می‌باشد.

جدول ۳. نتایج مدل‌سازی بر مبنای تحلیل رگرسیون غیرخطی بر حسب شاخص‌های تنوع زیستی

کد	مدل‌های رگرسیون	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$R^2$	$R^2_{Adj}$	RMS	SEE	AIC
۷	$Y = b_0 + b_1(H') + b_2(H')^2 + b_3(H')^3$	۵۷۱/۳۴	-۱۷۷/۰۸	۸۶/۹۱	-	۰/۲۹۱	۰/۲۲۷	۹۴۲۱/۰۳	۹۷/۰۶	۱۵۸/۲۹
۸	$Y = b_0(H')^{b_1}$	۳۰۶/۵۲	۰/۸۷۱	-	-	۰/۲۹۵	۰/۲۶۴	۰/۰۲۴	۰/۱۵۶	-۱۶۹/۱۷
۹	$Y = \text{Exp}(b_0 + \frac{b_1}{H'})$	۷/۱۲	-۱/۵۸	-	-	۰/۲۸۷	۰/۲۵۶	۰/۰۲۵	۰/۱۵۸	-۱۶۸/۱۵
۱۰	$Y = b_0 \times \text{Exp}(b_1 H')$	۲۱۸/۰۱	۰/۴۷۱	-	-	۰/۳۰۱	۰/۲۷۲	۰/۰۲۴	۰/۱۵۵	-۱۶۹/۱۷
۱۱	$Y = b_0(D)^{b_1}$	۳۱۷/۶۶	-۰/۳۲۳	-	-	۰/۳۰۲	۰/۲۷۲	۰/۰۲۴	۰/۱۵۵	-۱۶۹/۱۷
۱۲	$Y = \text{Exp}(b_0 + \frac{b_1}{D})$	۵/۹۱	۰/۰۷۱	-	-	۰/۳۲۱	۰/۲۹۱	۰/۰۲۳	۰/۱۵۳	-۱۷۱/۲۳
۱۳	$Y = b_0 \times \text{Exp}(b_1 D)$	۷۰۴/۲۸	-۱/۳۱	-	-	۰/۲۷۴	۰/۲۴۳	۰/۰۲۵	۰/۱۵۸	-۱۶۸/۱۵

Y: ترسیب کربن بر حسب تن در هکتار،  $R^2$ : ضریب تبیین،  $R^2_{Adj}$ : ضریب تبیین تعدیل یافته، RMS: میانگین مربعات باقی‌مانده‌ها، SEE: اشتباه معیار تخمین، VIF: فاکتور تورم واریانس، AIC: ضریب اطلاعات آکاییک می‌باشد.

نداشتند از ارائه آنها صرف نظر شد.

کلیه مدل‌های غیرخطی بهینه با تبدیل لگاریتم طبیعی چند متغیره با تحلیل رگرسیون خطی چندگانه در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. مقادیر عددی شاخص‌های اعتبارسنجی مربوط به مدل‌های تبدیلی توابع غیرخطی برحسب شاخص‌های مختلف همبسته نشان دادند که با امکان افزایش تعداد پارامترهای محاسباتی از طریق تبدیل لگاریتم طبیعی دقت مدل دارای تفاوت قابل ملاحظه‌ای نشده است (جدول ۴). از اینرو نسبت به توابع غیرخطی دارای اولویت محاسباتی نیستند.

### بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از تحقیق حاضر نشان داد که در واقع تغییرات کل ذخایر وزنی ترسیب کربن تا عمق مورد مطالعه در جنگل مورد مطالعه مستقل از تغییرات تنوع زیستی پوشش درختی می‌باشد. در این رابطه فرجی و همکاران (۱۱) نیز در مطالعه‌ای در جنگل‌های آمیخته راش نشان دادند که همبستگی بین تنوع زیستی پوشش درختی و مقادیر ترسیب کربن زی‌توده روی زمینی معنی‌داری نبود. با توجه به اینکه تغییرات مقادیر ترسیب کربن تحت تأثیر تغییرات زی‌توده گیاهی می‌تواند دارای تغییرات باررزی باشد (۲۵ و ۲۸)، از اینرو می‌توان به‌نوعی این چنین استنباط کرد که قطعاً ارتباط معنی‌داری بین مقادیر ترسیب کربن خاک و تنوع زیستی پوشش درختی نمی‌تواند وجود داشته باشد. البته کربی و پتوین (۲۷) نیز در مطالعات خود در جنگل‌های تروپیکال اذعان کردند که بین تغییرات تنوع زیستی پوشش درختی از جمله غنای کلیه پوشش گیاهی و مقادیر وزنی ترسیب کربن در لایه‌های مختلف ارتباط معنی‌داری وجود ندارد. در واقع نتایج مذکور تقریباً منطبق با نتایج حاضر می‌باشد. کربی و پتوین (۲۷) عدم ارتباط معنی‌داری بین مقادیر ترسیب کربن و تغییرات تنوع زیستی پوشش درختی را به تغییرپذیری زیاد الگوهای مکانی کربن در جنگل مورد مطالعه ارتباط دادند. البته مبتنی بر فرضیه آشیان مکمل (Niche complementary) در مناطقی که دارای حداکثر تنوع

زیستی گیاهی بوده احتمال حضور گونه‌های مختلف گیاهی یا مقادیر تولیدی بالا و با ضریب تأثیر زیاد بر میزان ترسیب کربن آلی اکوسیستم بیشتر است (۲۷ و ۳۲).

در پژوهش حاضر بین شاخص‌های تنوع زیستی پوشش علفی و مقادیر ترسیب کربن همبستگی معنی‌داری وجود داشت. در واقع اسحاقی‌راد و همکاران (۱) و جیکوت و کریزوا (۲۰) عنوان کردند که ویژگی‌های پوشش علفی از جمله توزیع، تنوع و نوع گونه‌ای) بیانگر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محسوب شده و در واقع به‌نوعی معرف تغییرات کلیه ویژگی‌های خاک (از جمله میزان ترسیب کربن) می‌باشد. در پژوهش حاضر همان‌طور که مشاهده شد بین مقادیر ترسیب کربن خاک در محدوده عمق مورد مطالعه و شاخص‌های تنوع، یکنواختی و غلبه گونه‌ای ارتباط معنی‌داری وجود دارد. ولی با توجه به نتایج آزمون همبستگی پیرسون، ارتباط بین مشاهدات و شاخص‌های اندازه‌گیری شده به‌صورت خطی نشان داده شده است. با توجه به روابط پیچیده عوامل اکولوژیکی در اکوسیستم‌های طبیعی، روابط خطی نمی‌تواند به‌طور بارز بیانگر تغییرات واریانس بین مقادیر همبسته و عوامل توصیفی باشد. به‌همین دلیل در پژوهش حاضر علاوه بر تحلیل رگرسیون خطی ساده و مدل‌های خطی چندگانه از روش تحلیلی رگرسیون به‌روش تخمین منحنی در قالب مدل‌های غیرخطی استفاده شد. پژوهش‌های زیادی برای پیش‌بینی و مدلسازی خصوصیات فیزیکی- شیمیایی خاک از جمله مقادیر ذخایر کربن آلی خاک صورت گرفته است. در این رابطه سرمدیان و همکاران (۸) و واحدی و همکاران (۱۷) برای مدلسازی تغییرات ترسیب کربن آلی خاک بر مبنای تحلیل مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه مدل‌هایی را براساس عوامل توصیفی فیزیکی و شیمیایی خاک ارائه داده‌اند. اگر چه دقت برآوردی در مطالعه ایشان زیاد بوده ( $R^2 = 0/87 - 0/89$ ) ولی بر مبنای انتخاب متغیرهای مستقل در مطالعه ایشان، می‌توان گفت اندازه‌گیری متغیرهای عامل برای برآورد مقادیر کربن ترسیب شده به لحاظ هزینه و زمان به‌صرفه نیست و بیشتر به لحاظ

جدول ۴. نتایج مدل‌سازی بر مبنای تحلیل رگرسیون تخمین منحنی مدل‌های غیرخطی تبدیلی بر حسب شاخص‌های تنوع زیستی

کد	توابع رگرسیون	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$R^2$	$R^2_{Adj}$	RMS	SEE	VIF	CF	AIC
۱۴	$\ln Y = b_0 + b_1 \ln(H') + b_2 \ln(D) + b_3 \ln(J')$	۵/۸۱	۰/۵۹۴	-۰/۰۷	۰/۱۳۸	۰/۳۰۴	۰/۲۰۵	۰/۰۲۶	۰/۱۶۲	۲۸/۵۸	۱/۰۱۳	-۱۶۱/۷۱
۱۵	$\ln Y = b_0 + b_1 \ln(H' \times J')$	۶/۰۷۸	۰/۴۸۱			۰/۲۹۵	۰/۲۶۵	۰/۰۲۴	۰/۱۵۵	-	۱/۰۱۱	-۱۶۹/۱۷
۱۶	$\ln Y = b_0 + \frac{b_1}{H'} + \frac{b_2}{D}$	۶/۲۲	-۰/۴۱۳	-۰/۰۵۳		۰/۳۰۹	۰/۲۴۷	۰/۰۲۵	۰/۱۵۷	۸/۵۶	۱/۰۱۲	-۱۶۵/۵۵
۱۷	$\ln Y = b_0 + b_1(H') + b_2(D)$	۵/۶۷	۰/۳۵۸	-۰/۳۶		۰/۳۰۵	۰/۲۴۲	۰/۰۲۵	۰/۱۵۸	۵/۶۲	۱/۰۱۲	-۱۶۵/۵۴

Y: ترسیب کربن بر حسب تن در هکتار،  $R^2$ : ضریب تبیین،  $R^2_{Adj}$ : ضریب تبیین تعدیل یافته، RMS: میانگین مربعات باقی‌مانده‌ها، SEE: اشتباه معیار تخمین، VIF: فاکتور تورم واریانس، CF: فاکتور تصحیح، AIC: ضریب اطلاعات آکاییک می‌باشد.

در نظر گرفته و مجزا از نوع رابطه بین متغیرها، همبستگی بین متغیرهای عامل و عدم توزیع تقارن داده‌ها، حداکثر دقت برآوردی را ارائه می‌دهد (۱۶). ولی در این پژوهش برای افزایش دقت برآورد و قطعیت محاسباتی از مدل‌های غیرخطی با توابع مختلف استفاده شد و برای آزمون افزایش قطعیت مدل‌های بهینه مذکور، تعداد پارامترها با روش تبدیل لگاریتمی افزایش یافتند. نتایج نشان داد که در مدل‌های غیرخطی اشتباه معیار تخمین و میانگین مربعات باقی‌مانده‌ها به حداقل میزان رسید. از طرفی شاخص اطلاعات آکاییک نشان داد که مدل‌های غیرخطی تک متغیره و مدل‌های تبدیلی لگاریتمی با تعداد پارامترهای مختلف دارای قطعیت محاسباتی خیلی بیشتری نسبت به مدل‌های خطی چندگانه هستند. نتایج نشان داد که مدل کرو بر حسب غلبه گونه‌ای پوشش علفی دارای حداکثر دقت برآورد و حداقل خطای تخمین می‌باشد. در واقع چون بین غلبه گونه‌ای پوشش علفی و مقادیر ترسیب کربن آلی عمق مورد مطالعه خاک همبستگی منفی وجود دارد، از اینرو در قالب مدل کرو با توجه به ارائه عامل توصیفی مزبور در مخرج پارامتر محاسباتی، شاخص غلبه گونه‌ای در مدل غیرخطی کرو به‌عنوان بهترین پیشگو برای برآورد ذخایر کربن آلی معرفی شد. با توجه به اینکه اکثر پژوهش‌های صورت گرفته در قالب عنوان پژوهش حاضر، از تکنیک شبکه عصبی مصنوعی به‌عنوان مکمل برای تحلیل رگرسیون خطی ساده و چندگانه به‌منظور

اکولوژیکی قابلیت تحلیل و تفسیر دارند. پبله‌ور شهری و همکاران (۶) و مقیمی و همکاران (۱۵) در رابطه با پیش‌بینی مقادیر ترسیب کربن خاک به ترتیب با استفاده از آنالیز داده‌های سطح زمین و عوامل فیزیوگرافی به‌روش تحلیلی رگرسیون خطی چندگانه مبنای اعتبار مدل را فقط براساس ضریب همبستگی برآزش عوامل توصیفی و پاسخ ارائه دادند (۵۳/۰ = R). در پژوهش حاضر نیز دقت برآورد ترسیب کربن خاک بر مبنای مقدار ضریب تبیین  $R^2$  بیشتر بوده است ولی نتایج اعتبارسنجی قطعیت محاسباتی مدل‌ها نشان داد که مدل‌های ارائه شده در صورت حضور عوامل توصیفی دیگر مطمئناً دارای دقت بیشتری خواهند بود. در حقیقت، نتایج تحقیق حاضر نشان داده است که تقریباً بیش از ۶۰ درصد از تغییرات واریانس حاصل شده مربوط به تغییرات عواملی بوده است که در انتخاب مدل بهینه لحاظ نشده است. این امر نشان می‌دهد که اگر چه مدل‌های حاضر دارای دقت برآوردی قابل ملاحظه و قطعیت محاسباتی هستند، ولی مقادیر پاسخ مورد مطالعه علاوه بر شاخص‌های تنوع زیستی به عوامل دیگر محیطی و اداپتیکی نیز وابسته است. در اکثر مطالعات مدل‌سازی معمولاً برای افزایش دقت برآورد خصوصیات خاک از جمله ترسیب کربن آلی خاک، علاوه بر مدل‌های خطی چندگانه از سیستم‌های هوش مصنوعی و شبکه عصبی مصنوعی نیز استفاده شد (۷، ۸، ۱۵ و ۳۳). شبکه عصبی مصنوعی معمولاً حداقل نظم بین داده‌ها را



محاسباتی ریاضی خروجی‌های بهینه شبکه‌های عصبی در قالب جعبه سیاه ارائه می‌شود که دسترسی به آن به صورت جامع سخت و استفاده کاربردی از آنها بعضاً ناممکن است. بنابراین، با ارائه مدل‌های بهینه غیرخطی در پژوهش حاضر با دقت قابل ملاحظه و قطعیت زیاد، به صورت کاربردی می‌توان درک درستی در رابطه با استفاده اجرایی و تحلیل اکولوژیکی در رابطه با پیش‌بینی و پایش ذخایر وزنی ترسیب کربن آلی خاک در جنگل مورد مطالعه داشت.

افزایش دقت برآورد خصوصیات فیزیکی- شیمیایی و ترسیب کربن آلی خاک استفاده شد، نتایج حاضر نشان داد که مدل‌های غیرخطی در قالب تحلیلی رگرسیون به روش تخمین منحنی می‌تواند نسبت به مدل‌های خطی چندگانه دارای دقت بیشتر و قطعیت محاسباتی زیادتری باشد. اگر چه با توجه به مطالعات مذکور، سیستم‌های هوش مصنوعی از جمله شبکه عصبی مصنوعی دارای دقت برآورد بیشتری نسبت به تحلیل‌های رگرسیون خطی چندگانه می‌باشند (۱۹) ولی بر خلاف مدل‌های

### منابع مورد استفاده

- اسحاقی‌راد، ج.، ق. زاهدی امیری، م. ر. مروی مهاجر و ا. متاجی. ۱۳۸۸. ارتباط بین پوشش‌های رستنی با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در جوامع راش (مطالعه موردی: جنگل آموزشی پژوهشی خیرود کنار نوشهر). *تحقیقات جنگل و صنوبر ایران* ۲: ۱۷۴-۱۸۷.
- اسماعیل‌زاده، ا. و س. م. حسینی. ۱۳۸۶. رابطه بین گروه‌های اکولوژیک گیاهی با شاخص‌های تنوع زیستی گیاهی در ذخیره‌گاه سرخدار افراتخته. *محیط شناسی* ۴۳: ۲۱-۳۰.
- بی‌نام، ۱۳۸۷. طرح جنگلداری سری سه گلندرود (تجدید نظر دوم)، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان مازندران- نوشهر.
- بی‌همتا، م. ر. و م. ع. زارع چاهوکی. ۱۳۹۰. اصول آمار در علوم منابع طبیعی. انتشارات دانشگاه تهران، ۳۰۰ ص.
- پوربابایی، ح. و د. خدایار. ۱۳۸۴. تنوع گونه‌های گیاهان چوبی در جنگل‌های سری یک کلاردشت، مازندران. *مجله زیست شناسی ایران* ۴: ۳۲۲-۳۰۷.
- پیلهور شهری، ا.، ش. ایوبی، و ح. خادمی. ۱۳۸۹. مقایسه مدل شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چند متغیره در پیش‌بینی کربن آلی خاک به کمک داده‌های آنالیز سطح زمین (مطالعه موردی: منطقه زرغام آباد سمیرم). *نشریه آب و خاک* ۶: ۱۱۶۳-۱۱۵۱.
- رضایی پزند، ح. و ا. بزرگ‌نیا. ۱۳۸۱. تحلیل رگرسیون غیرخطی و کاربردهای آن (ترجمه). انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۳۸۷ ص.
- سرمیدیان، ف.، ر. تقی‌زاده مهرجردی، م. ح. عسگری، و ع. اکبرزاده. ۱۳۸۹. مقایسه روش‌های نروفازی، شبکه عصبی و رگرسیون چند متغیره در پیش‌بینی برخی خصوصیات خاک (مطالعه موردی: استان گلستان). *مجله تحقیقات آب و خاک ایران* ۱: ۲۲۰-۲۱۱.
- علی‌جانپور شلمانی، ع.، م. شعبان‌پور، ح. اسدی و ف. باقری. ۱۳۹۰. تخمین پایداری خاکدانه در خاک‌های جنگلی استان گیلان به وسیله شبکه عصبی مصنوعی و توابع انتقالی رگرسیونی. *نشریه دانش آب و خاک* ۳: ۱۶۲-۱۵۳.
- غلامعلی‌زاده آهنگر، ا.، ف. سارانی، م. هاشمی و ا. شعبانی. ۱۳۹۳. مقایسه روش‌های رگرسیون خطی، زمین‌آماري و شبکه عصبی مصنوعی در مدلسازی کربن آلی در اراضی خشک دشت سیستان. *نشریه آب و خاک* ۶: ۱۲۶۰-۱۲۵۰.
- فرجی، ف.، ا. متاجی، س. بابایی کفاکی و ع. ا. واحدی. ۱۳۹۴. ارتباط بین تنوع گیاهی و تغییرات زی‌توده هوایی در جنگل‌های آمیخته راش شرقی (مطالعه موردی: حاجیکلا- تیرانکلی، ساری). *مجله جنگل ایران* ۲: ۱۶۵-۱۵۱.
- فهمیم، ز.، م. ا. دلاور و ا. گلچین. ۱۳۹۱. تأثیر نوع پوشش جنگلی بر ذخیره کربن آلی و خصوصیات خاک در جنگل خیرودکنار،

- نوشهر. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۶۳: ۱۴۹-۱۳۷.
۱۳. محمودی طالقانی، ع. ا.، ق. زاهدی امیری، ا. عادل و خ. ثاقب طالبی. ۱۳۸۶. برآورد ترسیب کربن خاک در جنگل‌های تحت مدیریت (مطالعه موردی: جنگل گل‌بند در شمال کشور). فصلنامه جنگل و صنوبر ۳: ۲۵۲-۲۴۱.
۱۴. مصداقی، م. ۱۳۸۴. بوم‌شناسی گیاهی. انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد، ۱۸۷ ص.
۱۵. مقیمی، س. ی. پرویزی، م. ح. مهدیان و م. ح. مسیح‌آبادی. ۱۳۹۳. کاربرد مقایسه‌ای رگرسیون خطی چندگانه و شبکه‌های عصبی مصنوعی برای شبیه‌سازی اثرات عوامل توپوگرافی بر تغییرات کربن آلی خاک. نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز ۴: ۳۲۲-۳۱۲.
۱۶. منہاج، م. ۱۳۸۱. مبانی شبکه‌های عصبی (هوش محاسباتی). جلد اول. مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیر کبیر، ۷۱۵ ص.
۱۷. واحدی، ع. ا.، ا. متاجی و س. م. حجتی. ۱۳۹۳. مدل‌سازی مخزن کربن آلی خاک در رابطه با ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک در جنگل گلدرد در شمال ایران. مجله پژوهش‌های خاک ۱: ۶۲-۵۳.
18. Burnham, K. P. and D. R. Anderson. 2002. Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information Theoretic Approach, Second Edition, Springer-Verlag, New York, 488 p.
19. Foody, G. M., D. S. Boyd and M. E. J. Cutler. 2003. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. *Remote Sensing of Environment* 85: 463-474.
20. Gegout, J. and E. Krizova. 2003. Comparison of indicator values of forest understory plant species in Western Carpathians (Slovakia) and Vosges Mountains (France). *Forest Ecology and Management* 182: 1-11.
21. Hollingsworth, T. N., E. A. G. Schuur, F. S. Schuur and M. D. Walker. 2008. Plant community composition as a predictor of regional soil carbon storage in Alaskan boreal black spruce ecosystems. *Ecosystems* 4: 629-642.
22. Ingleby, H. R. and T. G. Crowe. 2001. Neural network models for predicting organic matter content in Saskatchewan soils. *Canadian Biosystems Engineering* 43:71-75.
23. IPCC. 2007. Climate Change 2007. Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report. <http://www.mnp.nl/ipcc/>.
24. IUFRO Research Group. 2004. Improvement and Silviculture of Beech. Proceedings from the 7<sup>th</sup> International Beech Symposium. Research Institute of Forests and Rangelands, Iran, Tehran, p. 186.
25. Jandl, R., M. Lindner, L. Vesterdal, B. Bauwens, R. Baritz, F. Hagedorn, D. W. Johnson, K. Minkinen and K. A. Byrne. 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma* 137: 253-268.
26. Jimenez, J. J., R. Lal, H. A. Leblanc and R. O. Russo. 2007. Soil organic carbon pool under native tree plantations in the Caribbean lowlands of Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 241: 134-144.
27. 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.
28. Lal, R. 2005. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management* 220: 242-258.
29. Parr, J. F. and L. A. Sullivan. 2005. Soil carbon sequestration in phytoliths. *Soil Biology and Biochemistry* 37:117-124.
30. 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.
31. Peltoniemi, M., E. Thürig, S. Ogle, T. Palosuo, M. Schrupf, T. Wutzler, K. Butterbach-Bahl, O. Chertov, A. Komarov, A. Mikhailov, A. Gärdenäs, C. Perry, J. Liski, P. Smith and R. Mäkipää. 2007. Models in country scale carbon accounting of forest soils. *Silva Fennica* 41(3): 575-602.
32. Tilman, D., P. B. Reich, J. Knops, D. Wedin, T. Mielke and C. Lehman. 2001. Diversity and productivity in the long-term grassland experiment. *Science* 294: 843-845.
33. Toth, T., M. G. Schaap and Z. Molnar. 2008. Utilization of soil-plant interrelations through the use of multiple regression and artificial neural network in order to predict soil properties in hungarian solonchic grasslands. *Cereal Research Communications* 36: 1447-1450.
34. 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.