

تغییرات الگوی ذخیره کربن در رابطه با تغییرات فیزیکی و شیمیایی خاک (مطالعه موردی: پارک جنگلی سوکان سمنان)

علیرضا مشکی^{۱*}، الهام نوری^۲ و ندا سلیمان‌دهکردی^۳

*۱- نویسنده مسئول، استادیار، گروه جنگلداری مناطق خشک، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

پست الکترونیک: alireza_moshki@semnan.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- کارشناس ارشد بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۷/۱۳

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۳/۱۲

چکیده

این پژوهش به منظور مدل‌سازی تغییرات ذخیره کربن در ارتباط با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در توده‌های درختی کاج تهران (*Pinus eldarica* Medw.) و افاقیا (*Robinia pseudoacacia* L.) کاشته شده به صورت خالص و آمیخته در پارک جنگلی سوکان سمنان انجام شد. چهار تیمار خالص کاج تهران، خالص افاقیا، آمیخته کاج تهران و افاقیا و تیمار شاهد (منطقه بدون پوشش گیاهی) در نظر گرفته شدند. پس از نمونه‌برداری از خاک در افق‌های صفر تا ۵، ۱۰-۵، ۲۰-۱۰ و ۳۰-۲۰ سانتی‌متر در هر یک از این تیمارها، نمونه‌های خاک به آزمایشگاه منتقل و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که درخت کاج باعث کاهش اسیدیته خاک و افزایش مقدار پایداری خاک‌دانه‌ها شده بود. افاقیا باعث افزایش معنی‌دار مواد آلی، نیتروژن، پتاسیم و فسفر قابل جذب برای گیاهان شده بود. تیمار آمیخته به طور عمده وضعیت بینابینی داشت. مقدار ترسیب کربن در تیمارهای خالص افاقیا، خالص کاج تهران، آمیخته و شاهد به ترتیب ۲۸/۶۷، ۱۸/۷۴، ۲۴/۰۵ و ۱/۷۳ تن در هکتار بود. در مدل‌سازی مقدار ترسیب کربن در رابطه با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، نیتروژن و فسفر مهم‌ترین عامل‌های تأثیرگذار بر مقدار ترسیب کربن خاک تعیین شدند. بنابراین، افزایش نیتروژن خاک در این مناطق از طریق کاشت گونه‌های تثبیت‌کننده ازت می‌تواند نقش مهمی در افزایش موفقیت پروژه‌های جنگل‌کاری و ترسیب کربن داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: افاقیا، ترسیب کربن، جنگل‌کاری، کاج تهران.

مقدمه

بوم‌شناسان همواره به دنبال شناخت ارتباط ویژگی‌های خاک با پوشش گیاهی هستند و این کار را در مواردی با هدف ارزیابی توان رویشگاه انجام می‌دهند. همچنین، برآورد مقدار ذخیره کربن خاک به دلیل نقش دی‌اکسید کربن در گرمایش زمین و تغییرات اقلیمی از

گیاهان می‌تواند بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تأثیرگذار باشند و به طور متقابل از آن تأثیر بگیرند. همچنین، مقدار ذخیره کربن در خاک، نتیجه برهم‌کنش رابطه گیاه و خاک است (Rodriguez-loianz et al.,

کمترو نسبت کربن به نیتروژن بیشتر از توده‌های آمیخته بود (Rouhi-Moghadam et al., 2008).

هدف اصلی پژوهش پیش‌رو بررسی تأثیر گونه‌های غالب کاشته‌شده در پارک جنگلی سوکان سمنان بر ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک و مدل‌سازی رابطه این ویژگی‌ها با مقدار ترسیب کربن خاک بود. نتایج پژوهش می‌توانند در انتخاب بهتر گونه‌های مناسب کاشت در مناطق خشک و در نتیجه تغییر و بهبود ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک به‌منظور توسعه پوشش گیاهی و افزایش پتانسیل ترسیب کربن خاک مفید باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

پارک جنگلی سوکان سمنان در سه کیلومتری شرق سمنان در بخش جنوبی جاده اصلی تهران-مشهد بین طول‌های شرقی "۲۹'۲۰" ۵۳° تا "۳۱'۲۰" ۵۳° و عرض جغرافیایی "۳۵'۱۵" ۳۵° تا "۳۶'۷" ۳۵° شمالی واقع شده است. ارتفاع منطقه از سطح دریا در مرکز پارک ۱۱۱۷ متر است. بارش سالانه ۱۳۹/۹ میلی‌متر، میانگین درجه حرارت سالانه ۱۸/۳ درجه سانتیگراد و تبخیر سالانه ۱۹۶۲/۴ میلی‌متر است. بر اساس تقسیم‌بندی ترانسو، منطقه مورد مطالعه جزء مناطق خشک محسوب می‌شود.

روش پژوهش

پس از بازدید میدانی از منطقه طرح در قالب طرح کاملاً تصادفی، چهار تیمار در نظر گرفته شد: تیمار کاج تهران (منطقه سایه‌انداز درخت)، تیمار اقاچیا (منطقه سایه‌انداز درخت)، تیمار آمیخته کاج تهران و اقاچیا (منطقه سایه‌انداز مشترک) و تیمار شاهد (منطقه‌ای در فاصله نزدیک با منطقه جنگل‌کاری‌شده که عاری از هر گونه پوشش گیاهی بود). وسعت هر تیمار به‌صورت میانگین شش هکتار بود. برای بررسی ویژگی‌های خاک، چهار قطعه‌نمونه ۴۰۰ متر مربعی در محدوده هر تیمار (در مجموع ۱۶ قطعه‌نمونه) به‌صورت تصادفی پیاده شد و در هر قطعه‌نمونه پنج درخت به‌صورت تصادفی

اهمیت زیادی برخوردار است (MacDiken, 1997). بنابراین، شناخت دقیق فاکتورهای مؤثر بر مقدار ترسیب کربن در خاک می‌تواند در مدیریت آگاهانه و هدفمندانه پوشش‌های گیاهی با هدف کاهش خطرات محیط زیستی ناشی از افزایش دی‌اکسید کربن جو مؤثر باشد.

بر اساس نتایج Kelly و Farely (۲۰۰۴)، جنگل‌کاری کاج شعاعی (*Pinus radiata*) در مناطق خشک اکوادور در ۱۰ سانتی‌متر بالایی خاک، باعث افزایش غلظت نیترات و کاهش اسیدیته خاک شد، اما در فسفر خاک تغییری ایجاد نکرد. در ایتالیا مشخص شد که مقدار کربن آلی و ازت خاک در افق صفر تا ۱۵ سانتی‌متر در جنگل‌کاری‌های آمیخته بلوط با توسکا بیشتر از جنگل‌کاری‌های خالص بلوط بود (Chiti et al., 2007). نتایج Matinkiya و همکاران (۲۰۱۰) نشان داد که کاج بروسیا باعث افزایش مقدار فسفر قابل جذب، شوری و درصد لوم خاک شده و اقاچیا باعث افزایش مقدار ازت، کربن آلی و پتاسیم خاک شد. در پژوهش دیگری مشخص شد که اقاچیا به‌طور معنی‌داری مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی، کربن آلی، نیتروژن و فسفر را در خاک زیر توده خود نسبت به مناطق مجاور بدون پوشش گیاهی افزایش داد (Qiu et al., 2010). همچنین، ثابت شد که کیفیت مواد آلی در خاک زیراشکوب اقاچیا بیشتر از کاج بادامی (*P. pinea*) بود (Makineci & Keskin, 2009).

خاک‌هایی با درصد شن بیشتر دارای تبادلات بیشتر کربن با اتمسفر هستند و بنابراین مقدار ترسیب کربن در آن‌ها کمتر است (Carlyle, 1993). علاوه‌براین، مقدار ترسیب کربن خاک با اتمسفر می‌تواند به عامل‌هایی چون اسیدیته، رس خاک و مقدار عناصر غذایی نیز مرتبط باشد (Hollings Worth et al., 2008). در پژوهشی در جنگل گلندرود، نسبت کربن به نیتروژن، فسفر، نیتروژن و مقدار رس خاک به‌ترتیب فاکتورهای مهم خاک در مقدار ذخیره کربن خاک بیان شد (Vahedi, 2012). در مقایسه جنگل‌کاری خالص و آمیخته بلندمازو نیز مشخص شد که در خاک تحت پوشش توده خالص بلندمازو، مقدار ازت

نمونه خاک برای بررسی به آزمایشگاه فرستاده شدند.

عملیات آزمایشگاهی

ابتدا نمونه‌ها پس از خشک شدن در دمای اتاق کوبیده شده و از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. بافت خاک با استفاده از روش هیدرومتری، درصد خاکدانه‌های پایدار با روش الک تر، اسیدیته خاک با دستگاه pH متر و شوری خاک با تهیه گل اشباع و توسط دستگاه EC متر تعیین شدند. کربن آلی با روش والکی-بلاک، ازت خاک با روش کج‌دال، فسفر قابل جذب به روش Olsen و پتاسیم قابل جذب به روش فلیم فتومتری اندازه‌گیری شدند. آهک، کربنات و بی‌کربنات موجود در خاک نیز با روش تیتراسیون تعیین شدند (Ghazanshahi, 1996). مقدار ترسیب کربن بر اساس رابطه ۱ محاسبه شد.

(شماره‌گذاری کلیه درختان موجود در قطعه‌نمونه و انتخاب تصادفی بین شماره‌ها) انتخاب شدند. در تیمار آمیخته، پنج جفت درخت کاج تهران و افاقیا با همپوشانی تاجی انتخاب شدند. قطعات نمونه در مجاورت یکدیگر بودند و دارای شرایط توپوگرافی، زمین‌شناسی و اقلیمی مشابه بودند. برای بررسی بهتر شدت و نوع تأثیر پوشش گیاهی بر خاک، نمونه‌گیری خاک در اعماق صفر تا ۵، ۵ تا ۱۰، ۱۰ تا ۲۰ و ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متری انجام شد. به‌منظور یکسان بودن شرایط نمونه‌گیری، کلیه نمونه‌برداری‌های خاک در منطقه سایه‌انداز و در جهت جغرافیایی شمالی انجام شدند. سپس در هر قطعه‌نمونه، با مخلوط کردن پنج نمونه خاک برداشت شده در هر عمق، یک نمونه خاک ترکیبی به‌دست آمد. بنابراین در هر تیمار با چهار قطعه‌نمونه، ۱۶ نمونه خاک و در مجموع، ۶۴

$$\text{رابطه (۱)} \quad \text{BD} \times \text{E} \times \% \text{OC} \times 10000 = \text{ترسیب کربن (گرم در متر مربع)}$$

اعتبارسنجی مدل‌ها بر اساس ضریب تبیین تطبیق یافته (R^2_{adj})، حداقل اشتباه برآورد (SEE) و جذر میانگین حداقل مربعات خطا ($RMSE$) انجام شد. همچنین از فاکتور تورم واریانس (VIF) با مقدار قابل قبول کمتر از ۱۰ برای تأیید نهایی اعتبار مدل استفاده شد. پس از استخراج مدل‌های رگرسیونی پیش‌بینی مقدار ترسیب کربن در خاک از آزمون چاو ($Chow\ test$) برای مقایسه همسانی تأثیر متغیر مستقل مشترک بر مقدار ترسیب کربن استفاده شد (Cienciala, 2008). در انتها، فاکتورهای منتج شده از مدل‌های بهینه غیرخطی به‌دست‌آمده از هر تیمار برای محاسبه مدل نهایی و بهینه رابطه ترسیب کربن با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک ترکیب شدند.

نتایج

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در تیمارها و عمق‌های مختلف مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است.

که در آن: $\% \text{OC}$ درصد کربن آلی، BD وزن مخصوص ظاهری خاک بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب و E عمق نمونه‌برداری خاک بر حسب سانتی‌متر است (Mahmoudi Taleghani et al., 2006).

تجزیه و تحلیل آماری

از تجزیه واریانس یکطرفه برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شد و در صورت معنی‌داری تفاوت‌ها، مقایسات آماری به‌دلیل وجود تیمار شاهد، با استفاده از روش LSD در سطح اطمینان ۹۵٪ انجام شد. برای مدل‌سازی مقادیر ترسیب کربن در ارتباط با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از رگرسیون چندگانه با روش گام به گام استفاده شد. بدین‌صورت که در هر یک از تیمارها، ویژگی‌هایی از خاک که بیشترین ضریب همبستگی پیرسون را با مقدار ترسیب کربن خاک نشان می‌دادند، به‌ترتیب وارد مدل شدند و مدل‌های خطی و غیرخطی مختلف بر روی داده‌ها برازش داده شد.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در تیمارها و عمق‌های مختلف مورد بررسی در پارک جنگلی سوکان

عمق (سانتی‌متر)	تیمار	pH	EC (Ds/m)	O.M%	شن (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)	چگالی	N	P	K	آهک (درصد)	کربنات	بی‌کربنات
۰-۵	کاج تهران	۷/۳۹B ^c	۹/۷۰A ^b	۱/۱۵A ^b	۷۰/۲۲A ^a	۲۴/۹۶A ^a	۵/۰۲B ^a	۱/۵۱B ^c	۸۳۵A ^b	۱۱/۰۹A ^b	۱۹/۰۹A ^b	۳۰/۹۱A ^a	۲/۱۲A ^b	۳/۷۷A ^b
	آفاقیا	۷/۷۶B ^b	۱۰/۳۵A ^a	۲/۰۰A ^a	۷۴/۰۱A ^a	۲۰/۰۰A ^{ab}	۵/۹۵B ^a	۱/۶۷B ^b	۱۵۵۰A ^a	۲۴/۴۰A ^a	۲۹/۴۰A ^a	۲۹/۲۵A ^a	۲/۷۰A ^a	۳/۲۰A ^b
	آمیخته	۷/۹۰A ^a	۹/۳۱A ^b	۱/۲۹A ^b	۷۶/۰۰A ^a	۱۹/۰۰A ^{ab}	۵/۰۲A ^a	۱/۷۱C ^a	۱۲۲۵A ^a	۲۳/۸۹A ^a	۲۳/۸۹A ^a	۳۰/۹۳A ^a	۲/۹۹A ^a	۱/۶۶A ^a
	شاهد	۷/۹۱A ^a	۸/۳۵B ^c	۰/۱۱A ^c	۷۸/۹۶A ^a	۱۶/۰۳A ^c	۴/۹۵B ^a	۱/۷۵C ^a	۷۷A ^c	۲/۶۰A ^c	۲/۶۰B ^c	۳۰/۸۱A ^a	۱/۲۱C ^c	۱/۵۰A ^a
۵-۱۰	کاج تهران	۷/۹۴A ^a	۸/۹۰A ^a	۰/۱۶B ^b	۷۸/۳۰A ^a	۱۷/۳۰B ^a	۴/۹۵B ^a	۱/۹۷AB ^b	۳۲۷B ^b	۵/۱۷B ^b	۱۴/۰۰B ^b	۳۰/۹۱A ^a	۲/۰۰A ^a	۱/۰۰B ^b
	آفاقیا	۸/۱۰A ^a	۹/۱۰A ^a	۰/۴۸B ^c	۷۷/۵۰A ^a	۱۶/۵۳B ^a	۶/۰۳B ^a	۱/۹۲AB ^b	۵۹۰B ^a	۱۵/۱۲B ^c	۲۰/۵۳B ^a	۲۹/۲۰A ^a	۲/۵۰A ^b	۱/۷۰B ^a
	آمیخته	۸/۰۰A ^a	۸/۸۳B ^a	۰/۲۵B ^a	۷۹/۵۰A ^a	۱۵/۰۰B ^a	۵/۶۳A ^a	۱/۸۸C ^b	۴۷۲B ^{ab}	۱۰/۲۸B ^a	۱۷/۲۳A ^a	۳۱/۰۲A ^a	۱/۶۶C ^a	۱/۵۰A ^a
	شاهد	۷/۹۶A ^a	۹/۳۷A ^a	۰/۰۲B ^c	۷۹/۰۰A ^a	۱۶/۳۰A ^a	۴/۶۵B ^a	۲/۳۷B ^a	۲۴B ^c	۰/۷۵B ^c	۴/۱۰A ^c	۳۰/۹۳A ^a	۲/۳۷A ^b	۱/۳۳A ^a
۱۰-۲۰	کاج تهران	۷/۹۶A ^a	۶/۸۰B ^c	۰/۱۸B ^b	۷۶/۰۰A ^a	۱۷/۳۰B ^a	۷/۰۰A ^a	۲/۰۴AB ^b	۲۰۳C ^a	۱/۱۸C ^b	۱۱/۷۸C ^a	۳۱/۰۲A ^a	۱/۲۳B ^a	۱/۶۶B ^{ab}
	آفاقیا	۷/۹۰A ^a	۷/۸۳B ^b	۰/۳۸B ^a	۷۵/۹۰A ^a	۱۹/۵۰A ^a	۵/۰۲B ^a	۲/۱۳AB ^b	۳۶۳C ^b	۷/۰۱C ^c	۱۴/۰۷C ^a	۳۰/۷۱A ^a	۱/۷۰B ^a	۲/۱۳B ^a
	آمیخته	۷/۸۹A ^a	۷/۵۳C ^b	۰/۲۳B ^b	۷۵/۶۰A ^a	۱۹/۰۳A ^a	۵/۳۲A ^a	۲/۱۷B ^b	۲۹۷C ^a	۳/۱۴C ^a	۱۳/۹۲B ^a	۲۸/۷۰A ^a	۲/۰۰B ^a	۱/۰۰B ^a
	شاهد	۷/۹۳A ^a	۸/۹۰B ^a	۰/۰۱B ^c	۷۸/۸۰A ^a	۱۶/۱۰A ^a	۵/۵۰B ^a	۳/۴۰A ^a	۱۸B ^c	۰/۲۱C ^c	۱/۱۲C ^b	۳۰/۹۵A ^a	۲/۰۰B ^a	۱/۰۰A ^a
۲۰-۳۰	کاج تهران	۷/۹۷A ^a	۷/۰۲B ^b	۰/۰۸B ^b	۷۹/۳۳A ^a	۱۴/۵۲C ^b	۵/۳۳B ^a	۲/۳۲A ^b	۱۵۹C ^b	۰/۷۷C ^b	۹/۵۰C ^a	۳۰/۹۸A ^a	۲/۴۴A ^a	۱/۵۲B ^a
	آفاقیا	۸/۹۳A ^a	۷/۳۱B ^b	۰/۱۴B ^a	۷۷/۵۰A ^a	۱۴/۵۰B ^b	۷/۸۰A ^a	۲/۵۳A ^b	۲۸۰C ^a	۳/۶۷D ^a	۱۰/۰۵D ^a	۲۹/۹۴A ^a	۲/۲۰AB ^a	۱/۲۵B ^a
	آمیخته	۷/۸۴A ^a	۷/۵۳C ^b	۰/۱۹B ^a	۷۴/۰۶A ^a	۱۷/۳۰B ^a	۵/۶۹A ^a	۲/۸۸A ^a	۲۱۱C ^{ab}	۱/۷۳C ^{ab}	۹/۸۳C ^a	۳۰/۱۷A ^a	۲/۰۰B ^a	۱/۰۰B ^b
	شاهد	۷/۸۷A ^a	۹/۵۹A ^a	۰/۰۱B ^c	۷۹/۵۵A ^a	۱۱/۲۳B ^b	۸/۶۵A ^a	۱/۹۵C ^c	۱۴B ^c	۰/۰۳C ^c	۰/۹۷C ^b	۳۲/۳۳A ^a	۲/۰۰B ^a	۱/۰۰A ^b

حروف بزرگ انگلیسی نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ویژگی خاک در یک تیمار در عمق‌های مختلف (۰-۵، ۵-۱۰، ۱۰-۲۰، ۲۰-۳۰) مورد بررسی است.

حروف کوچک انگلیسی نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ویژگی خاک بین تیمارهای مختلف (کاج تهران، آفاقیا، آمیخته و شاهد) در افق مورد بررسی است.

مقیاس اندازه‌گیری کربنات، بی‌کربنات و K، میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم خاک و مقیاس اندازه‌گیری N و P میلی‌گرم بر کیلوگرم است.

که همه مزیت‌های مذکور را که برای هر یک از گونه‌های درختی بیان شد، به صورت هم‌زمان اما با شدت کمتری دارا بود. در تیمارهای مختلف تفاوت معنی‌داری از نظر بافت خاک و مقدار آهک دیده نشد.

جدول ۲- درصد خاکدانه‌های پایدار

شاهد	آمیخته	اقاقیا	کاج تهران
۳/۶۰ ^c	۱۸/۷۸ ^b	۱۴/۶۱ ^b	۳۵/۱۹ ^a
درصد خاکدانه‌های پایدار			

مقدار ترسیب کربن (تن در هکتار) در تیمارهای مختلف مورد بررسی در جدول ۳ ارایه شده است.

نتایج این پژوهش نشان داد که جنگل‌کاری مورد بررسی باعث افزایش مواد آلی و کاهش شوری و اسیدیته خاک شده بود که این عوامل تأثیر زیادی در حاصلخیزی خاک دارند. همچنین، جنگل‌کاری باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش درصد خاکدانه‌های پایدار شده بود (جدول ۲). افاقیا از نظر افزایش مواد آلی و عناصر غذایی اصلی مورد نیاز گیاهان به خاک تأثیر بیشتری داشت. در نتیجه افزایش ماده آلی، مقدار نیتروژن، پتاسیم و فسفر خاک افزایش یافته که به نوبه خود باعث افزایش حاصلخیزی خاک شده بود. کاج تهران نیز باعث افزایش معنی‌دار اسیدیته خاک و افزایش معنی‌دار درصد خاکدانه‌های پایدار خاک شده بود که از این جهت بر افاقیا برتری نشان می‌داد. تیمار آمیخته خصوصیتی حد واسط بین دو گونه را نشان می‌داد

جدول ۳- مقدار ترسیب کربن (تن در هکتار) در تیمارهای مختلف به تفکیک عمق‌های مختلف خاک

شاهد	آمیخته	کاج تهران	اقاقیا	عمق خاک (سانتی‌متر)
۰/۹۶۸ ^c	۱۱/۰۳۸ ^{ab}	۸/۶۸۸ ^b	۱۶/۷۸ ^a	۰-۵
(۰/۰۵)	(۲/۳۲)	(۰/۹۸)	(۲/۶۵)	
۰/۲۴۲ ^c	۲/۳۵ ^c	۱/۶۷ ^b	۴/۶ ^a	۵-۱۰
(۰/۰۸)	(۱/۱۲)	(۰/۷۸)	(۱/۴۴)	
۰/۳۴ ^B ^c	۵/۲ ^a	۶/۵۳ ^a	۳/۸۳ ^B ^b	۱۰-۲۰
(۰/۱۴)	(۰/۶۸)	(۱/۱۳)	(۰/۹۸)	
۰/۱۹ ^B ^d	۵/۴۷ ^B ^a	۱/۸۶ ^B ^b	۳/۵۴ ^B ^b	۲۰-۳۰
(۰/۱۰)	(۲/۰۳)	(۰/۱۹)	(۰/۴۲)	
۱/۷۳ ^c	۲۴/۰۵ ^{ab}	۱۸/۷۴ ^b	۲۸/۶۷ ^a	۰-۳۰
(۰/۶۵)	(۷/۱۲)	(۳/۷۶)	(۵/۵۹)	

اعداد داخل پرانتز انحراف معیار از میانگین هستند.

حروف بزرگ انگلیسی نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ویژگی خاک در یک تیمار در عمق‌های مختلف (۰-۵، ۵-۱۰، ۱۰-۲۰، ۲۰-۳۰) مورد بررسی است. حروف کوچک انگلیسی نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ویژگی خاک بین تیمارهای مختلف (کاج تهران، افاقیا، آمیخته و شاهد) در افق مورد بررسی است.

بودند (جدول ۴). همچنین، آزمون همسانی چاو نشان داد که اهمیت عنصرهای نیتروژن و فسفر در ترسیب کربن در تیمارهای مختلف، متفاوت بود (جدول ۵).

مدل‌سازی مقدار ترسیب کربن خاک با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نشان داد که در کلیه تیمارها، نیتروژن و فسفر مهم‌ترین فاکتورهای مستقل تعیین کننده

جدول ۴- مدل‌های رگرسیونی ارتباط مقدار ترسیب کربن خاک با ویژگی‌های خاک

تیمار	مدل بهینه رگرسیون	R^2_{adj}	SEE	F	بیشینه VIF	RMSE
کاج تهران	$C_{seq} = 0.01(P) \cdot 0.8^{-P} + 2/25$	۰/۹۷	۰/۵۱	۶۳/۶۸*	۱/۰۰	۰/۱۶
اقاقیا	$C_{seq} = 0.92 \ln(N) + 0.16$	۰/۸۹	۰/۲۳	۲۵/۹۴*	۱/۰۰	۰/۱۱
آمیخته	$C_{seq} = 0.003(P) \cdot 0.6^{-P} + 5/67$	۰/۹۸	۰/۰۵	۶۰۵۳/۴۸**	۱/۰۰	۰/۰۵
شاهد	$C_{seq} = 0.45 \ln(N) - 1.04$	۰/۸۷	۰/۱۲	۲۱/۴۸*	۱/۰۰	۰/۰۷
ترکیبی با استفاده از فاکتورهای مستخرج از مدل‌های غیرخطی بهینه	$C_{seq} = 0.017(N) \cdot 0.61 - 0.99(P)^{0.87} + 0.47$	۰/۹۳	۱۶/۳۰	۸۲/۴۳*	۲/۴۷	۰/۴۵

C_{seq} : ترسیب کربن (تن در هکتار)؛ N : مقدار نیتروژن کل (میلی‌گرم بر کیلوگرم)؛ P : مقدار فسفر قابل جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم)؛ R^2_{adj} : ضریب تبیین تطبیق‌یافته؛ SEE: مجموع اشتباه برآورد؛ * معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد؛ ** معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد؛ VIF: فاکتور تورم واریانس؛ RMSE: جذر میانگین مربعات خطا (تن بر هکتار)

جدول ۵- نتایج آزمون همسانی ضریب‌های تبیین در تیمارهای مختلف (آزمون چاو)

فرضیه صفر	F	معنی‌داری	نتیجه
تأثیر فاکتور نیتروژن خاک در مقدار ترسیب کربن در تیمارهای بررسی شده یکسان بود	۳/۳۷	۰/۰۰۰**	رد فرض صفر
تأثیر فاکتور فسفر خاک در مقدار ترسیب کربن در تیمارهای بررسی شده یکسان بود	۲/۱۴	۰/۰۲*	رد فرض صفر

** معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد؛ * معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد

بحث

بیشتر از منطقه شاهد بود که می‌توان آن را به مواد آلی بیشتر در این مناطق و نقش این مواد در پیوستگی بیشتر ذرات خاک به یکدیگر مرتبط دانست. همچنین در پژوهش‌های مختلف مرتبط با تغییرات پایداری خاکدانه‌ها در مناطق مختلف کشورمان، این تغییرات متأثر از مواد آلی ذکر شده است (Tajik, 2001). علاوه بر این، کاج تهران تأثیر زیادی در افزایش مقدار خاکدانه‌های پایدار نسبت به اقاویا داشت که می‌تواند به دلیل pH کمتر در خاک تحت پوشش کاج تهران و در نتیجه کمتر شدن پراکندگی ذرات خاک باشد (Mishra, 2002).

بر اساس نتایج پژوهش پیش‌رو، کاج تهران pH خاک را به‌طور معنی‌داری بیشتر از اقاویا تحت تأثیر قرار داد. کاهش بیشتر اسیدیته خاک توسط سوزنی‌برگان نسبت به پهن‌برگان به دلیل نوع مواد آلی، در مطالعات پیشین مورد تأیید قرار گرفته است (Augusto et al., 2002). در افق اول خاک

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مقدار ماده آلی در تیمار اقاویا از سایر تیمارها بیشتر بود. بنابراین، انتظار می‌رود که کمترین جرم مخصوص ظاهری در این تیمار دیده شود، در صورتی‌که جرم مخصوص ظاهری در این تیمار بیشتر از تیمار کاج تهران بود. دلیل این امر می‌تواند کمتر بودن pH خاک در تیمار کاج تهران باشد. بر اساس مطالعات پیشین، کاهش pH خاک باعث کاهش پراکندگی ذرات خاک و افزایش فضای خالی و در نتیجه کاهش جرم مخصوص ظاهری می‌شود (Mishra, 2002). همچنین، با افزایش عمق شاهد افزایش جرم مخصوص ظاهری در تمامی تیمارها بودیم که علت این امر کاهش مواد آلی، دانه‌بندی ناقص و یا عدم وجود دانه‌بندی و تراکم بیشتر خاک است (Jafari et al., 2004). بر اساس نتایج این مطالعه، در منطقه دارای پوشش گیاهی، مقدار خاکدانه‌های پایدار به‌طور معنی‌داری

خاک باشد (Moshki & Lamesrsdorf, 2011b). با افزایش عمق و کم شدن مواد آلی و فعالیت ریشه‌ها، مقدار ترسیب کربن در خاک کم می‌شود، اما با افزایش عمق و فشار لایه‌های بالایی مقدار فشردگی خاک و در نتیجه مقدار جرم مخصوص ظاهری خاک افزایش می‌یابد که رابطه معکوس بین مقدار ترسیب کربن و جرم مخصوص ظاهری را توجیه می‌کند (Shukla & Misra, 1993; Zarrinkafsh, 1993). براساس مدل‌های نهایی رگرسیونی به دست آمده از این پژوهش، نیتروژن و فسفر مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر بر ترسیب کربن بودند (جدول ۵). نیتروژن باعث تحریک پذیری تجزیه لاشبرگ‌های تازه شده و در مراحل از تجزیه هوموس خاک جلوگیری می‌کند که بدین ترتیب باعث افزایش مقدار ذخیره کربن خاک می‌شود (Jandel *et al.*, 2007). همچنین، نیتروژن و فسفر از جمله عناصر غذایی هستند که در افزایش زی‌توده گیاهی و پیرو آن افزایش مقدار ترسیب کربن نقش دارند. قارچ‌های میکوریزی در نتیجه همزیستی با ریشه گیاهان باعث نگهداری کربن بیشتری در میسلیوم خود شده که این فعالیت با جذب عناصر غذایی نیتروژن و فسفر بیشتر می‌شود (Langley *et al.*, 2006; Rillig & Mummey, 2006). نتایج تحقیقات Varamesh و همکاران (۲۰۰۹)، درصد رس خاک و نیتروژن را مهم‌ترین عامل‌های مؤثر بر ترسیب کربن خاک در توده کاج تهران و اقاچیا معرفی کرد. آن‌ها مقدار ترسیب کربن توسط اقاچیا و کاج تهران را به ترتیب ۷۸ و ۵۷ تن محاسبه کردند که به‌طور معنی‌داری از نتایج پژوهش پیش‌رو بیشتر است. این تفاوت را می‌توان به شرایط متفاوت اکولوژیکی مناطق نسبت داد. Vahedi (۲۰۱۲) نشان داد که بین درصد پوشش درختان غالب و مقدار ذخیره کربن خاک رابطه معنی‌داری وجود داشت. یافته‌های پژوهش پیش‌رو موافق با این نتایج است. از آنجا که بیشترین مقدار ترسیب کربن در منطقه مورد مطالعه به ترتیب در توده‌های اقاچیا، آمیخته (کاج تهران و اقاچیا) و کاج تهران بود، بنابراین ورود اقاچیا به‌عنوان گونه همراه در اشکوب بالا (در تیمار آمیخته) به‌عنوان گونه‌ای با قابلیت بیشتر ترسیب کربن نسبت به کاج

اختلاف معنی‌داری بین شوری خاک در تیمارهای با پوشش گیاهی نسبت به تیمار شاهد وجود داشت که دلیل آن را باید در آبیاری این دو تیمار و عدم آبیاری تیمار شاهد دانست، زیرا به دلیل تبخیر و تعرق زیاد در منطقه، نمک‌ها بر اثر پدیده مویینگی به افق سطحی منتقل شده و با تبخیر آب در سطح خاک تجمع می‌کنند، اما در افق‌های پایین‌تر مقدار شوری خاک در تیمارهای دارای پوشش گیاهی کمتر می‌شود که علت آنرا شاید بتوان ترشحات ریشه‌ای و تجزیه بقایای درختان دانست (Panagopolous, 1995).

مواد آلی خاک نقش مهمی بر خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک داشته و تأثیر زیادی بر ظرفیت تبادل کاتیون‌ها، فعالیت‌های میکروبیولوژیکی و خاکدانه‌ها دارند (Moshki & Lamesrsdorf, 2011a). نوع و ترکیب پوشش گیاهی نه تنها بر کیفیت بلکه بر مقدار مواد آلی در یک منطقه تأثیرگذارند (Augusto *et al.*, 2002; Schulp *et al.*, 2008). مقدار مواد آلی در تیمارهای مورد بررسی در تیمار مربوط به اقاچیا و تیمار آمیخته نسبت به تیمار کاج تهران بیشتر بود که می‌توان آنرا به فراوانی و تجزیه سریع‌تر لاشبرگ‌های اقاچیا نسبت به کاج تهران نسبت داد.

در مجموع، بافت خاک بین تیمارهای مختلف تفاوت معنی‌داری را نشان نداد (جدول ۲). Nobakht و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند که جنگل‌کاری ۳۸ ساله در شمال ایران با چهار گونه پیسه‌آ، کاج سیاه، ون و بلندمازو باعث تغییراتی در بافت خاک شد. به نظر می‌رسد با توجه به خشک بودن منطقه و بارندگی کم و همچنین جوان بودن پوشش گیاهی، زمان بیشتری برای تغییر بافت و ساختمان خاک مورد نیاز است. براساس نتایج این پژوهش، مقدار عناصر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم در تیمارهای اقاچیا و آمیخته تفاوت معنی‌داری را با تیمار کاج تهران نشان داد که دلیل آن کاملاً روشن است. منشأ اصلی این عناصر غذایی مواد آلی موجود در خاک هستند. از تجزیه مواد آلی خاک است که این عناصر در دسترس گیاه قرار می‌گیرند. توانایی زیاد اقاچیا در تثبیت ازت جو به کمک باکتری‌های تثبیت‌کننده ازت می‌تواند عامل اصلی افزایش این عنصر در

- Tatarinov, F., 2008. Biomass functions applicable to oak trees grown in Central-European forest. *Journal of Forest Science*, 54(3): 109-120.
- Farley, K.A. and Kelly, E.F., 2004. Effects of afforestation of a Paramo grassland on soil nutrient status. *Forest Ecology and Management*, 195(3): 281-290.
- Ghazanshahi, J., 1996. *Soil and Plant Analysis*. Published by Homa, Tehran, 311p (In Persian).
- Hollingsworth, T.N., Schuur, E.A.G., Chapin, F.S. and Walker, M.D., 2008. Plant community composition as a predictor of regional soil carbon storage in Alaskan boreal black spruce ecosystems. *Ecosystems*, 11(4): 629-642.
- Jafari, M., Azarnivand, H., Tavakoli, H., Zehtabian, G. and Esmailzadeh, H., 2004. Investigation of effects on sand dunes and stabilization and improvement in Kashan. *Pajouhesh & Sazandegi*, 64: 16-21 (In Persian).
- Jandel, R., Lindner, M., Bauwens, B., Baritz, R., Hageclorn, F., Johnson, D.W., Minkinen, K. and Byrne, K.A., 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration. *Geoderma*, 137: 253-268.
- Langley, J.A., Chapman, S.K. and Hungate, B.A., 2006. Ectomycorrhizal colonization slows root decomposition: the post-mortem fungal legacy. *Ecology letters*, 9(8): 955-959.
- MacDicken, K.G., 1997. A guide to monitoring carbon storage in forestry and Agroforestry projects. *Minrock International Institute for Agriculture Development, Forest Carbon Monitoring Program*, p. 91.
- Mahmoudi Taleghani, E., Zahedi, Gh., Adeli, E. and Sagheb Talebi, Kh., 2006. Estimates of carbon sequestration in forests under management (Case study: Gonbad forest). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 15(3): 241-252 (In Persian).
- Makineci, E. and Keskin, T., 2009. Some soil properties on coal mine spoils reclaimed with black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) and umbrella pine (*Pinus pinea* L.) in Agacli-Istanbul. *Environmental Monitoring and Assessment*, 159(1-4): 407-414.
- Matinkiya, M., Pilevar, B. and Matinfar, H., 2010. The effect of afforestation with conifers and broad leaf species on some physical and chemical properties of soil (Case study: Dorud forest park). *Journal of Iranian Natural*
- تهران باعث بیشتر شدن مقدار ذخیره کربن آلی نسبت به توده کاج خالص شده بود. همچنین، Vahedi و همکاران (۲۰۱۴) نسبت کربن به نیتروژن، فسفر قابل جذب، نیتروژن و مقدار رس را از مهم ترین عامل های مؤثر در پیش بینی ذخایر کربن خاک دانسته اند. ایشان نیتروژن و فسفر را از جمله عناصر مهم در فرآیند بیولوژیکی، افزایش زی توده های گیاهی و بنابراین افزایش ذخیره کربن خاک دانسته اند که موافق با نتایج پژوهش پیش رو است، اما نقش رس در افزایش مقدار ذخیره کربن خاک در پژوهش پیش رو مشاهده نشد که شاید به دلیل شنی بودن خاک های منطقه مورد مطالعه و مقدار کم رس موجود در آنها و عدم تفاوت معنی دار اجزای بافت خاک در تیمارهای مختلف بود.
- نتایج پژوهش پیش رو به صورت بارزی بیانگر اهمیت انتخاب گونه در پروژه های جنگل کاری در مناطق خشک با هدف اصلاح ویژگی های خاک است. اجرای پروژه های ترسیب کربن در اکوسیستم های خشک به دلیل ظرفیت زیاد ذخیره کربن خاک از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. با توجه به نتایج پژوهش پیش رو مبنی بر نقش مهم نیتروژن و فسفر در مقدار ترسیب کربن خاک، هر گونه افزایش نیتروژن و فسفر خاک در این مناطق از طریق بیولوژیکی (کاشت گونه های تثبیت کننده ازت) می تواند نقش مهمی در افزایش موفقیت پروژه های ترسیب کربن داشته باشد.

References

- Augusto, L., Jacques, L., Binkley, D. and Roth, A., 2002. Impacts of several common tree species of European temperate forests on soil fertility. *Annals of Forest Science*, 59: 233-252.
- Carlyle, J., 1993. Organic carbon in forested sandy soils: properties, processes and the impact of forest management. *New Zealand Journal of Forest Science*, 23: 390-402.
- Chiti, T., Cerini, G., Puglisi, A., Sanesi, G., Capperucci, A. and Forte, C., 2007. Effects of associating a N-fixer species to monotypic oak plantations on the quantity and quality of organic matter in mine soils. *Geoderma*, 138(1-2): 162-169.
- Cienciala, E., Apltauer, J., Exnerová, Z. and

- Rouhi-Moghaddam, E., Hosseini, S.M., Ebrahimi, E., Tabari, M. and 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(3-4): 1149-1160.
- Schulp C.J.E., Naburus, G.J., Verburg, P. and Waal, R.W., 2008. Effect of tree species on carbon stock in forest floor and mineral soil and implication for soil carbon inventories. *Forest Ecology and Management*, 256(3): 482-490.
- Shukla, A.K. and Misra, P.N., 1993. Improvement of sodic soil under tree cover. *Indian Forester*, 119: 43-52.
- Tajik, F., 2001. Evaluation of the aggregate stability in some parts of Iran. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 1: 107-123 (In Persian).
- Vahedi, A., 2012. The relationship between biodiversity and carbon sequestration rate in natural forests of north Iran (Case study: Noor Galanderroud forest). Ph.D. thesis, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, 127p (In Persian).
- Vahedi, A., Mataji, A. and Hodjati, M., 2014. Modeling soil organic carbon pool weight associated with soil physico-chemical properties within Glandrood forest in Northern Iran. *Iranian Journal of Soil Research*, 28(1): 53-62 (In Persian).
- Varamesh, S., Hoseini, M., Abdi, N. and Akbarinya, M., 2009. The effect of increased carbon sequestration in afforestation and improvement of soil characteristics. *Iranian Journal of Forest*, 2(1): 25-35 (In Persian).
- Zarrinkafsh, M., 1993. *Applied Soil Science*. Tehran University Press, Tehran, 342p (In Persian).
- Ecosystems, 2(2): 89-97 (In Persian).
- Mishra, A., Shamra, S.D. and Khan, G.H., 2002. Rehabilitation of degraded sodic lands during a decade of *Dalbergia sissoo* plantation in Soltanpur district of Uttar Pradesh India. *Land Degradation and Development*, 13(5): 375-386.
- Moshki, A.R. and Lamersdorf, N.P., 2011a. Growth and nutrient status of introduced black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) afforestation in arid and semi arid areas of Iran. *Research Journal of Environmental Sciences*, 5(3): 259-268.
- Moshki, A.R. and Lamersdorf, N.P., 2011b. Symbiotic nitrogen fixation amongst four black locust, (*Robinia pseudoacacia* L.) seed sources. *Journal of Forestry Research*, 22(4): 689-692.
- Nobakht, A., Pourmajidian, M., Hojjati, S.M. and Fallah, A., 2011. A comparison of soil carbon sequestration in hardwood and softwood monocultures (Case study: Dehmian forest management plan, Mazandaran). *Iranian Journal of Forest*, 3: 13-22 (In Persian).
- Panagopolous, T., 1995. Early growth of *pinus nigra* and *Robinia* stands and contributions to soil genesis and landscape improvement on lignite spoil in ptolemaida. *Landscape and Urban Planning*, 32: 19-29.
- Qiu, L., Zhang, X., Cheng, J. and Yin, X., 2010. Effects of black locust (*Robinia pseudoacacia*) on soil properties in the loessial gully region of the Loess Plateau, China. *Plant and Soil*, 332(1): 207-217.
- Rillig, M.C. and Mummey, D.L., 2006. Mycorrhizas and soil structure. *New Phytology*, 171: 41-53.
- Rodriguez-loianz, G., Onaindia, M., Amezaga, I., Mijangos, I. and Garbisu, C., 2008. Relationship between vegetation diversity and soil functional diversity in native mixed-oak forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 40: 40-60.

The pattern of soil carbon sequestration changes regarding physico-chemical soil properties (Case study: Semnan Soka forest park)

A.R. Moshki^{1*}, E. Nouri² and N. Soleyman Dehkordi³

1*- Corresponding author, Assistant Prof., Department of Forestry in Arid Regions, Faculty of Desert Studies, University of Semnan, Semnan, Iran. E-mail: alireza_moshki@semnan.ac.ir

2- Ph.D. Student Desert Studies, Faculty of Desert Studies, University of Semnan, Semnan, Iran

3- M.Sc. Desert Studies, Faculty of Desert Studies, University of Semnan, Semnan, Iran

Received: 01.06.2016

Accepted: 04.10.2016

Abstract

This study was carried out to model the soil carbon sequestration changes regarding to soil physical and chemical properties in pure and mixed stands of Eldar pine (*Pinus eldarica* Medw.) and black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) planted in Semnan Soka forest park. Four different treatments including pure Eldar pine, pure black locust, mixed of these species and control (without any plant cover) were considered. Soil samples were taken from different soil depth (0-5, 5-10, 10-20, and 20-30 cm) in the treatments and transported to laboratory for further analysis. The results showed that the Eldar pine trees decreased soil acidity and increased aggregates stability of soil. Black locust increased organic matter content, phosphorus, potassium, and nitrogen content of soil which can improve the quality of poor soils of this area. The mixed treatments affect soil properties partly between two above mentioned treatments. The carbon sequestration for Robinia, Pine, mixed and control treatments were 28.67, 18.74, 24.05 and 1.73 tons per hectare, respectively. The modeling of carbon sequestration with physical and chemical properties of soil, the nitrogen and phosphorus were determined as the most important effecting factors on the soil carbon sequestration. Therefore, increasing soil nitrogen in such regions via biological methods (planting nitrogen fixing plants) can play important role in success of afforestation and carbon sequestration projects in such regions.

Keyword: Afforestation, carbon sequestration, *Pinus eldarica*, *Robinia pseudoacacia*.