

تأثیر جنگل کاری با گونه‌های پهن برگ و سوزنی برگ بر پایداری خاکدانه‌ها و ترسیب کربن خاک در منطقه ریمله خرم‌آباد

احد زیدی جودکی^۱، بابک پیله‌ور^{۲*} و حمزه جعفری سرابی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

۲* - نویسنده مسئول، دانشیار، گروه جنگل‌داری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. پست الکترونیک: pilehvar.b@lu.ac.ir

۳- دکتری جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان لرستان، خرم‌آباد، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۷

چکیده

در پژوهش پیش‌رو اثر جنگل‌کاری با گونه‌های پهن‌برگ و سوزنی‌برگ بر برخی ویژگی‌های خاک در جنگل‌کاری‌های منطقه ریمله خرم‌آباد بررسی شد. این پژوهش در قالب یک طرح کامل تصادفی با چهار تیمار سرو نقره‌ای، کاج بروسیا، بادام کوهی و منطقه شاهد در چهار تکرار انجام شد. پس از اندازه‌گیری ویژگی‌های اشکوب درختی شامل قطر برابرسینه، سطح تاج و ارتفاع در هر قطعه‌نمونه (۲۰×۲۰ متر مربع)، دو نمونه ترکیبی خاک نیز از عمق‌های صفر تا ۱۰ و ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متری برداشت شد. در این نمونه‌ها، نسبت اندازه‌های خاکدانه و شن خاک، بُعد فراکتال، میانگین وزنی (MWD) و هندسی قطر (GMD) خاکدانه‌ها به همراه ترسیب کربن خاک اندازه‌گیری شدند و با استفاده از تجزیه واریانس دوطرفه مقایسه شدند. براساس نتایج به دست آمده، خاکدانه‌های درشت (بیشتر از ۲۰۰۰ میکرومتر) و ریز (کمتر از ۵۳ میکرومتر) و پایداری آن‌ها در خاک تیپ‌های بادام کوهی و کاج بروسیا به طور معنی‌داری بیشتر از خاک سرو نقره‌ای و منطقه شاهد شدند. سرو نقره‌ای فقط مقدار خاکدانه‌های ریز خاک (۵۳ تا ۲۵۰ میکرومتر) و کمتر از ۵۳ میکرومتر) را به طور معنی‌داری افزایش داد. همچنین، بادام کوهی سبب افزایش معنی‌دار میانگین‌های وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها و ترسیب کربن خاک (حدود ۲۲ تن در هکتار) شد. به طور کلی در کوتاه‌مدت، بادام کوهی و کاج بروسیا نسبت به سرو نقره‌ای و منطقه شاهد با افزایش کربن آلی خاک سبب بهبود سریع‌تر پایداری خاکدانه‌ها و ویژگی‌های خاک شدند.

واژه‌های کلیدی: استان لرستان، بُعد فراکتال، خاک جنگلی، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها.

مقدمه

موجود در برگ و رهاسازی آن‌ها توسط لاشه‌ریزی می‌توانند ویژگی‌های خاک عرصه‌های جنگل‌کاری شده را تغییر دهند (Malasadi et al., 2021). اگرچه نقش جنگل‌کاری‌ها در ترسیب کربن زی‌توده، آشکار است (Nosetto et al., 2006)، اما تأثیر آن بر سرعت، مقدار و کیفیت ذخیره کربن خاک، متغیر است و می‌تواند تحت تأثیر عامل‌های مختلفی مانند مقدار بارندگی (Guo & Gifford,

بوم‌سازگان‌های جنگلی زاگرس تحت عنوان جنگل‌های نیمه‌خشک با وسعتی حدود پنج میلیون هکتار، ۴۰ درصد از کل جنگل‌های ایران را به خود اختصاص داده‌اند (Sagheb-Talebi et al., 2005). یکی از راه‌های احیای جنگل‌های تخریب‌یافته زاگرس، جنگل‌کاری با گونه‌های مناسب است. گونه‌های درختی متفاوت با ترکیب‌های شیمیایی مختلف

گیاهی و خصوصیات مانده بافت خاک، کربن آلی خاک، فعالیت‌های زیستی، یون‌های تبادل و رطوبت در دسترس است (Zhang *et al.*, 2010). در پژوهش‌های متعدد اشاره شده است که با ازدیاد خاکدانه‌های بزرگ و نیز افزایش میانگین‌های وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها، پایداری خاک افزایش می‌یابد (Liu *et al.*, 2013). همچنین، افزایش نسبت خاکدانه‌های بزرگ به‌طور مثبتی با حاصلخیزی خاک ارتباط دارد (Mao *et al.*, 2014). این خاکدانه‌ها، ظرفیت بیشتری نسبت به خاکدانه‌های ریزتر برای ذخیره کربن آلی خاک دارند، درحالی‌که کربن آلی خاک در خاکدانه‌های کوچک، پایداری و قدیمی‌تر است (Six *et al.*, 1998; Onweremadu *et al.*, 2010). پایداری خاکدانه‌ها می‌تواند متأثر از ویژگی‌هایی مانند مقدار رس، اکسیدهای آهن، کربنات‌کلسیم و مواد آلی باشد (Barthès *et al.*, 2008). در این رابطه، کربن آلی خاک از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر خاکدانه‌سازی، توزیع اندازه و پایداری خاکدانه‌ها محسوب می‌شود (Domínguez *et al.*, 2001; Green *et al.*, 2007). در واقع، گونه‌های درختی از طریق ریشه‌دوانی، خزان برگ و لاش‌برگ سبب ورود مواد آلی به خاک می‌شوند و با تغییر مشخصه‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، پایداری خاکدانه‌ها را کنترل می‌کنند (Mao *et al.*, 2014). Caron و همکاران (۱۹۹۶) عنوان کردند که مواد آلی با ایجاد یک پوشش آب‌گریز در اطراف خاکدانه‌ها و کاهش سرعت خیس شدن آن‌ها سبب تعدیل حساسیت ساختمان خاک به تخریب می‌شوند. به‌طورکلی در پژوهش‌های متعددی، تأثیر جنگل‌کاری بر حفظ آب‌و‌خاک و ترسیب کربن خاک بررسی شده است، اما اثرات جنگل‌کاری‌های انجام‌شده با گونه‌های پهن‌برگ و سوزنی‌برگ بر پایداری خاکدانه‌ها، کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. Pilehvar و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که در کوتاه‌مدت، گونه‌های پهن‌برگ در مقایسه با سوزنی‌برگان سبب ترسیب کربن بیشتری در خاک می‌شوند. نتایج پژوهش Mao و همکاران (۲۰۱۴) نیز نشان داد که با افزایش کربن آلی ورودی به خاک، ابعاد خاکدانه‌ها افزایش می‌یابد و

رویش گونه‌های درختی، سن توده، بافت خاک، تغییر کاربری اراضی و مدیریت توده قرار گیرد (Derner & Schuman, 2007). ترسیب کربن در بوم‌سازگان‌های جنگلی به‌معنی توانایی زی‌توده گیاهی و خاک به‌منظور جذب دی‌اکسیدکربن اتمسفر و ذخیره بلندمدت آن به‌صورت ترکیب‌های کربنی است (Fang *et al.*, 2007). خاک به‌عنوان بزرگ‌ترین مخزن کربن در خشکی، بیشترین مقدار این عنصر را نسبت به اتمسفر و زی‌توده گیاهی در خود جای داده است (Lehmann & Kleber, 2015). ذخیره کربن آلی خاک نسبت به مدیریت و کاربری زمین، بسیار حساس است (Tate *et al.*, 2007)، بنابراین هر نوع عملیات زیستی و مکانیکی که مانع سیر قهقرایسی خاک و پوشش گیاهی شود، گام مثبتی در راستای مدیریت ترسیب کربن خواهد بود (Dianati Tilaki *et al.*, 2009).

خاکدانه‌ها، ذرات ثانویه‌ای هستند که در اثر هم‌آوری ذرات اولیه رس، سیلت و شن به‌همراه مواد آلی و عوامل سیمانی و اتصال‌دهنده تشکیل می‌شوند و به‌عنوان یکی از اجزای اصلی خاک، تأثیر معنی‌داری بر کیفیت خاک دارند (Bronick & Lal, 2005). توزیع اندازه خاکدانه‌ها از ویژگی‌های مهم فیزیکی خاک محسوب می‌شود (Skaggs *et al.*, 2001) که در ارتباط نزدیک با تولید رواناب (Barthès *et al.*, 2008)، تعیین خصوصیات آبی خاک (Hwang, 2004)، تخلخل، تغییرات درجه‌حرارت، رطوبت و فرایندهای فرسایشی خاک است و به‌تبع آن‌ها، رشد گیاه و تولید محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Díaz-Zorita *et al.*, 2002). از طرفی، نسبت اندازه خاکدانه‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در زمینه آشفستگی خاک به‌منظور تعیین مدیریت پایدار خاک به‌شمار می‌آید (Zobeck *et al.*, 2003). در این رابطه، میانگین‌های وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها به‌همراه بُعد فراکتال از شاخص‌های بیان توزیع اندازه خاکدانه‌ها هستند. بعد فراکتال، سنجش ترکیبی از بی‌نظمی و خردشوندگی خاکدانه‌ها را ارائه می‌کند (Gregory *et al.*, 2012). فرایند تشکیل خاکدانه، نتیجه تقابل عواملی همچون محیط، مدیریت خاک، اثر پوشش

بایر (با فاصله اندکی از توده‌های جنگل‌کاری شده به‌عنوان شاهد) در مناطق مشابه از نظر فیزیوگرافی انجام شد. در منطقه شاهد با فیزیوگرافی و شرایط بوم‌شناختی مشابه با سه منطقه جنگل‌کاری شده، پوشش مرتعی با گونه‌های یک‌ساله مستقر بود. سطح تاج، قطر برابرسینه و ارتفاع درختان آشکوب درختی در هر تیپ جنگل‌کاری با استفاده از چهار قطعه‌نمونه ۴۰۰ متر مربعی (۲۰×۲۰ متر مربع) به‌صورت تصادفی اندازه‌گیری شد (Chen et al., 2017). سپس در هر قطعه‌نمونه، یک نمونه ترکیبی از خاک (متشکل از سه نمونه تصادفی) در عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری و یک نمونه ترکیبی (متشکل از سه نمونه تصادفی) در عمق ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متری با استفاده از اگر برداشت شد (Chen et al., 2017). در مجموع، نمونه‌های برداشت‌شده از عمق‌های اول و دوم خاک در تیپ‌های مورد مطالعه ۳۲ عدد بود. این نمونه‌ها پس از خشک شدن در هوای آزاد در سرنده با الک هشت میلی‌متری برای اندازه‌گیری طبقه‌های شن و خاکدانه‌های خاک (Wang et al., 2016) و الک دو میلی‌متری برای اندازه‌گیری اسیدیت، هدایت الکتریکی و کربن آلی خاک به آزمایشگاه منتقل شدند. در این پژوهش، pH خاک به روش پتانسیومتری و با استفاده از pH متر، هدایت الکتریکی با هدایت‌سنج الکتریکی، غلظت کربن آلی به روش والکی-بلک و وزن مخصوص ظاهری خاک با استفاده از روش کلوخه-پارافین اندازه‌گیری شدند. جداسازی و اندازه‌گیری چهار طبقه شن و خاکدانه‌های خاک براساس روش Six و همکاران (۱۹۹۸) با استفاده از سه الک و در شرایط مرطوب انجام گرفت. شن و خاکدانه‌ها به چهار طبقه بزرگ‌تر از ۲۰۰۰ میکرومتر، ۲۵۰ تا ۲۰۰۰ میکرومتر، ۵۳ تا ۲۵۰ میکرومتر و اندازه کمتر از ۵۳ میکرومتر تقسیم شدند. به این صورت که ۱۰۰ گرم خاک به‌عنوان نمونه در آب یونیزه‌شده که زیر آن، یک الک ۲۰۰۰ میکرومتر قرار داشت، غوطه‌ور شد. بعد از پنج دقیقه، الک کردن شروع شد. الک طی دو دقیقه ۵۰ بار و با فاصله سه سانتی‌متری در راستای عمود تکان داده شد. سپس، خاکی که روی الک ۲۰۰۰ میکرومتر باقی مانده بود، جمع‌آوری

در نتیجه، خاکدانه‌ها پایدارتر می‌شوند. Chen و همکاران (۲۰۱۷) بیان داشتند که پس از جنگل‌کاری از ذخیره کربن آلی خاک کاسته می‌شود، اما این مقدار با بالغ شدن جنگل‌کاری افزایش می‌یابد. به‌طورکلی، پژوهش پیش‌رو در نظر دارد که تأثیر جنگل‌کاری با بادام کوهی (*Amygdalus scoparia* Spach) (به‌عنوان یک گونه پهن‌برگ بومی ایران با پراکنش وسیع در جنگل‌های زاگرس) و گونه‌های سوزنی‌برگ سرو نقره‌ای (*Pinus Cupressus arizonica* Greene) و کاج بروسیا (*Pinus brutia* Ten.) را بر پایداری خاکدانه‌ها و ذخیره کربن خاک ارزیابی کند. در نهایت، گونه‌های مناسب جنگل‌کاری به‌منظور بهبود ساختمان خاکدانه‌ها و افزایش ترسیب کربن خاک معرفی می‌شوند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با مساحتی حدود ۶۰ هکتار در زیرحوضه ریمله و ۳۵ کیلومتری شمال شهر خرم‌آباد بین طول جغرافیایی $48^{\circ} 22' 23''$ تا $48^{\circ} 25' 26''$ شرقی و عرض $31^{\circ} 41' 37''$ تا $32^{\circ} 40' 33''$ شمالی قرار دارد. این منطقه در سال ۱۳۷۲ با استفاده از گونه‌های سرو نقره‌ای، کاج بروسیا و بادام کوهی جنگل‌کاری شده است. توده‌های مذکور با مساحت‌های مختلف از دو تا چهار هکتار به‌صورت خالص و تصادفی در سراسر منطقه جنگل‌کاری پراکنش دارند. میانگین درجه‌حرارت و بارندگی سالانه در این منطقه به‌ترتیب $17/3$ درجه سانتی‌گراد و ۵۰۰ میلی‌متر است. منطقه ریمله به‌طور متوسط حدود ۲۰۰۰ متر از سطح دریا ارتفاع دارد و اقلیم آن براساس روش دومارتن، نیمه‌خشک تا مدیترانه‌ای است. خاک این منطقه نیز در رده آنتی‌سول قرار دارد (Jamshidnia et al., 2016).

روش پژوهش

نمونه‌برداری در قالب یک طرح کامل تصادفی با چهار تیمار شامل سرو نقره‌ای، کاج بروسیا، بادام کوهی و منطقه

$$\text{GMD} = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln d_i^-}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$D = 3 - \frac{\lg(w(\delta < d_i^-)/w_0)}{\lg(d_i^-/d_{max}^-)} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن‌ها، d_i^- نشان‌دهنده میانگین قطر ذرات خاک باقی مانده روی هر الک بین اندازه‌های d_i و d_{i+1} ($i=1, 2, \dots$) و w_i کسر d_i^- را در مجموع جرم هر اندازه ذرات خاک را نشان می‌دهد. همچنین، σ : اندازه محیط، $w(\sigma < d_i^-)$: جرم تجمعی ذرات با اندازه $\sigma < d_i^-$ و w_0 : جرم کل هر اندازه از ذرات خاک هستند. ترسیب کربن خاک نیز با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شد.

شد و در آون در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد. همچنین، آب و خاکی که از الک ۲۰۰۰ میکرومتر عبور کرده بود، برای تکرار این عمل به الک بعدی (۲۵۰ میکرومتر) وارد شد. طی عملیات الک کردن هم خاکدانه‌ها و هم ذرات شنی که به همان طبقه تعلق داشتند، در داخل الک‌ها باقی می‌مانند. مقدار شن و خاکدانه‌های شنی که بزرگ‌تر از ۵۳ میکرومتر بودند، در یک کوره الکتریکی با درجه حرارت ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و با استفاده از آب دیونیزه جدا شدند (Wang et al., 2016). در پژوهش پیش‌رو، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD)، میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD) و بعد فراکتال (D) به ترتیب از رابطه‌های (۱) تا (۳) محاسبه شد. واحد اندازه‌گیری MWD و GMD میکرومتر بود.

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n d_i^- w_i \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\text{SOC} = [\text{SOC}] \times \text{Bulk Density} \times \text{Depth} \times \text{Coarse Fragments} \times 10 \quad \text{رابطه (۴)}$$

چندگانه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون دانکن و همبستگی بین کربن آلی با برخی مشخصه‌های خاک با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون انجام شد. برای محاسبات آماری، از نرم‌افزار SPSS ver. 22 استفاده شد.

نتایج

آمار توصیفی مشخصه‌های قطر، سطح تاج و ارتفاع درختان در تیپ‌های جنگل کاری شده (بادام کوهی، سرو نقره‌ای و کاج بروسیا) در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به عدم وجود ساقه مشخص در گونه بادام کوهی، قطر برابر سینه این گونه در جدول ۱ نیامده است. جدول ۲ نیز نتایج توصیفی مشخصه‌های خاک در عمق‌های اول و دوم تیپ‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

که در آن، SOC مقدار ترسیب کربن آلی خاک (Mg C ha⁻¹), [SOC] مقدار کربن آلی خاک در حجم خاک برداشت شده (g C (kg soil)⁻¹), Bulk Density وزن مخصوص ظاهری خاک (Mg m⁻³), Depth عمق نمونه برداری (m), Coarse Fragments ناخالصی و قطعه‌های بزرگ (۱۰۰/درصد حجم قطعه‌های بزرگ) -۱) و عدد ۱۰ ضریب تبدیل واحد به Mg C ha⁻¹ هستند (Penman et al., 2003).

پس از تأیید نرمال بودن داده‌های جمع‌آوری شده و همگنی واریانس‌ها به ترتیب با آزمون‌های کولموگروف-سمیرنوف و لون، به منظور بررسی معنی‌داری تفاوت مشخصه‌های خاک بین تیپ‌های مختلف جنگل کاری و عمق خاک از آزمون تجزیه واریانس دوطرفه استفاده شد. مقایسه

جدول ۱- مشخصه‌های گونه‌های درختی (میانگین \pm اشتباه معیار) در تیپ‌های جنگل کاری شده

مشخصه	بادام کوهی	سرو نقره‌ای	کاج بروسیا
قطر برابر سینه (cm)	-	۹/۳ \pm ۰/۲۴	۱۸/۳۳ \pm ۰/۵۵
سطح تاج (m ²)	۱/۹۲ \pm ۰/۱۵	۷/۶۸ \pm ۰/۵۵	۱۱/۸۸ \pm ۰/۶۹
ارتفاع (m)	۱/۴۲ \pm ۰/۰۴	۴/۹۷ \pm ۰/۱۲	۷/۵۱ \pm ۰/۱۵

جدول ۲- مشخصه‌های خاک (میانگین \pm اشتباه معیار) در عمق‌های اول و دوم تیپ‌های مورد مطالعه

مشخصه	عمق خاک (cm)	بادام کوهی	منطقه شاهد	سرو نقره‌ای	کاج بروسیا
اسیدیته	۱۰-۰	۷/۹۵ \pm ۰/۰۲	۷/۹ \pm ۰/۰۱	۷/۹۴ \pm ۰/۰۲	۷/۹۸ \pm ۰
	۲۰-۱۰	۸/۰۲ \pm ۰/۰۱	۷/۹۴ \pm ۰	۸/۰۳ \pm ۰/۰۳	۷/۹۹ \pm ۰/۰۳
هدایت الکتریکی (ds/m ²)	۱۰-۰	۰/۳۲ \pm ۰	۰/۳۱ \pm ۰	۰/۲۶ \pm ۰/۰۱	۰/۲۷ \pm ۰
	۲۰-۱۰	۰/۲۷ \pm ۰	۰/۲۹ \pm ۰/۰۱	۰/۲۶ \pm ۰/۰۱	۰/۲۷ \pm ۰/۰۲
کربن آلی (%)	۱۰-۰	۲/۰۹ \pm ۰/۰۲	۱/۳۵ \pm ۰/۰۴	۱/۴۱ \pm ۰/۰۶	۱/۵۴ \pm ۰/۰۵
	۲۰-۱۰	۱/۴۷ \pm ۰/۰۶	۱/۳۲ \pm ۰	۱/۳۷ \pm ۰/۰۷	۱/۵۹ \pm ۰/۱۲
وزن مخصوص (g/cm ³)	۱۰-۰	۱/۵۴ \pm ۰/۱۳	۱/۶۸ \pm ۰/۱۷	۱/۵۱ \pm ۰/۱۵	۱/۳۷ \pm ۰/۱
	۲۰-۱۰	۱/۵۱ \pm ۰/۱۴	۱/۴۳ \pm ۰/۰۴	۱/۴۷ \pm ۰/۱۶	۱/۴۴ \pm ۰/۰۵

جدول ۳- تجزیه واریانس تغییرات اندازه طبقه‌های مختلف خاکدانه در ارتباط با تیپ‌های جنگل کاری و عمق‌های خاک

اندازه خاکدانه	منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره F
بیشتر از ۲۰۰۰ میکرومتر	تیپ جنگل کاری	۳	۲۱۱/۳۸	۱۰/۰۸ **
	عمق خاک	۱	۰	ns
۲۵۰-۲۰۰۰ میکرومتر	تیپ جنگل کاری \times عمق خاک	۳	۵۱/۶۳	۲/۴۶ ns
	تیپ جنگل کاری	۳	۷/۸۵	۰/۴۴ ns
۵۳-۲۵۰ میکرومتر	عمق خاک	۱	۴۴/۳۴	۲/۵۲ ns
	تیپ جنگل کاری \times عمق خاک	۳	۱۰۰/۸۵	۵/۷۵ **
کمتر از ۵۳ میکرومتر	تیپ جنگل کاری	۳	۱۷۹/۲۱	۳۶/۱۷ **
	عمق خاک	۱	۹/۸۷	۱/۹۹ ns
کمتر از ۵۳ میکرومتر	تیپ جنگل کاری \times عمق خاک	۳	۲۰/۴۲	۴/۱۲ *
	تیپ جنگل کاری	۳	۱۶۲/۶۴	۶/۷۱ **
کمتر از ۵۳ میکرومتر	عمق خاک	۱	۱۲۰۹/۰۹	۴۹/۹۳ **
	تیپ جنگل کاری \times عمق خاک	۳	۲/۷۷	۰/۱۱ ns

** معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد؛ * معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد؛ ns غیر معنی‌دار

نتایج مقایسه میانگین اندازه طبقه های خاکدانه در خاک تیپ های مختلف جنگل کاری نشان داد که بیشترین مقدار خاکدانه های بزرگ تر از ۲۰۰۰ میکرومتر در خاک تیپ های بادام کوهی و کاج بروسیا و کمترین مقدار آن در خاک تیپ سرو نقره ای وجود داشتند، در حالی که در این تیپ، بیشترین مقدار خاکدانه های ۵۳ تا ۲۵۰ میکرومتر مشاهده شد. برای خاکدانه های کمتر از ۵۳ میکرومتر نیز خاک تیپ های جنگل کاری، بیشترین مقدار را نسبت به خاک منطقه شاهد به خود اختصاص دادند (جدول ۴).

نتایج تجزیه واریانس دوطرفه خاکدانه ها در طبقه های مختلف نشان داد که اثرات اصلی تیپ جنگل کاری بر مقدار خاکدانه های با اندازه بیشتر از ۲۰۰۰، ۵۳ تا ۲۵۰ و کمتر از ۵۳ میکرومتر در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی دار بودند، در حالی که فقط مقدار خاکدانه های کوچک تر از ۵۳ میکرومتر به طور معنی داری بین عمق های مختلف خاک، تفاوت داشتند ($p < 0.01$). اثرات متقابل دو عامل مذکور نیز بر مقدار خاکدانه های با اندازه ۲۵۰ تا ۲۰۰۰ و ۵۳ تا ۲۵۰ میکرومتر در سطح اطمینان حداقل ۹۵ درصد معنی دار بودند (جدول ۳).

جدول ۴- مقایسه میانگین \pm اشتباه معیار اندازه طبقه های خاکدانه در ارتباط با تیپ های جنگل کاری و عمق های خاک

متغیر اندازه خاکدانه	عمق خاک (cm)	بادام کوهی	منطقه شاهد	سرو نقره ای	کاج بروسیا
	۱۰-۰	۲۴/۲۲ \pm ۲/۳۶ ^a	۱۷/۵۷ \pm ۲/۰۱ ^b	۹/۱۶ \pm ۱/۰۷ ^c	۲۱/۶۴ \pm ۴/۰۲ ^a
بیشتر از ۲۰۰۰ میکرومتر	۲۰-۱۰	۱۸/۱۵ \pm ۶/۳۷ ^a	۱۶/۰۲ \pm ۹/۷۳ ^a	۱۱/۷۴ \pm ۰/۸۹ ^a	۱۹/۶ \pm ۲/۱۴ ^a
میانگین کل		۲۱/۱۹ \pm ۵/۵ ^A	۱۶/۷۹ \pm ۷/۱۲ ^B	۱۰/۴۵ \pm ۱/۶۵ ^B	۲۰/۶۲ \pm ۳/۱۷ ^A
	۱۰-۰	۳۰/۲۴ \pm ۴/۳۹ ^b	۳۸/۵۵ \pm ۲/۵۷ ^a	۳۸/۴۳ \pm ۳/۲۱ ^a	۳۲/۹۱ \pm ۶/۵۶ ^a
۲۵۰-۲۰۰۰ میکرومتر	۲۰-۱۰	۳۴/۹۷ \pm ۲/۰۴ ^a	۳۱/۳۴ \pm ۳/۵۹ ^a	۲۸/۸۵ \pm ۶/۵۴ ^a	۳۵/۵۶ \pm ۰/۸۹ ^a
میانگین کل		۳۲/۶ \pm ۴/۰۵ ^A	۳۴/۹۴ \pm ۴/۸۲ ^A	۳۳/۶۴ \pm ۷ ^A	۳۴/۲۳ \pm ۴/۵۶ ^A
	۱۰-۰	۱۰/۰۷ \pm ۱/۹۶ ^b	۱۸/۶۵ \pm ۳/۱۱ ^a	۲۱/۴۶ \pm ۱/۰۱ ^a	۱۱/۱۹ \pm ۲/۴۵ ^b
۵۳-۲۵۰ میکرومتر	۲۰-۱۰	۱۱/۸۴ \pm ۱/۸۱ ^b	۱۳/۰۱ \pm ۲/۱۹ ^b	۲۰/۶۵ \pm ۳/۰۳ ^a	۱۱/۴۱ \pm ۱/۳۱ ^b
میانگین کل		۱۰/۹۶ \pm ۱/۹۸ ^C	۱۵/۸۳ \pm ۳/۹۱ ^B	۲۱/۰۵ \pm ۲/۱۳ ^A	۱۱/۳ \pm ۱/۸۲ ^C
	۱۰-۰	۳۵/۴۵ \pm ۴/۹۶ ^a	۲۵/۲۲ \pm ۱/۴۳ ^b	۳۰/۹۴ \pm ۲/۱۳ ^a	۳۴/۲۵ \pm ۵/۳ ^a
کمتر از ۵۳ میکرومتر	۲۰-۱۰	۲۳/۰۲ \pm ۵/۷۴ ^a	۱۲/۶۵ \pm ۵/۲۴ ^a	۲۰/۲۶ \pm ۸/۴۱ ^a	۲۰/۷۶ \pm ۱/۷۱ ^a
میانگین کل		۲۹/۲۴ \pm ۸/۲۹ ^A	۱۸/۹۳ \pm ۷/۶ ^B	۲۵/۶ \pm ۸/۰۵ ^A	۲۷/۵ \pm ۸/۰۸ ^A

حرف های متفاوت کوچک انگلیسی در هر سطر بیانگر اختلاف معنی دار (حداقل ۹۵ درصد) بین تیمارهای مورد مطالعه در هر کدام از عمق های خاک هستند، در حالی که حرف های متفاوت بزرگ، اختلاف معنی دار (حداقل ۹۵ درصد) تیمارها برای میانگین دو عمق خاک را نشان می دهند.

سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی دار به دست آمد. نتایج دیگر تجزیه واریانس نشان داد که اثرات اصلی تیپ جنگل کاری و عمق خاک و نیز اثرات متقابل آنها بر میانگین های وزنی و هندسی قطر خاکدانه ها و مقدار ترسیب کربن خاک در سطح اطمینان حداقل ۹۵ درصد معنی دار بودند، اما بعد فراکتال خاکدانه ها فقط تحت تأثیر عمق خاک بود ($p < 0.01$) (جدول ۵).

نتایج تجزیه واریانس دوطرفه شن خاکدانه ها در طبقه های مختلف نشان داد که اثرات اصلی تیپ جنگل کاری بر مقدار همه طبقه های شن خاکدانه ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی دار بودند. همچنین، فقط مقدار شن خاکدانه های با اندازه بیشتر از ۲۰۰۰ میکرومتر به طور معنی داری بین عمق های مختلف خاک، تفاوت داشتند ($p < 0.01$). اثرات متقابل دو عامل مذکور نیز بر مقدار همه اندازه های شن به جز طبقه ۵۳ تا ۲۵۰ میکرومتر در

جدول ۵- تجزیه واریانس تغییرات میانگین وزنی قطر، میانگین هندسی قطر و بعد فراکتال خاکدانه‌ها و ترسیب کربن خاک در ارتباط با تیپ‌های

جنگل کاری و عمق‌های خاک

متغیر	منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره F
	تیپ جنگل کاری	۳	۰/۵	۱۳/۶۹ **
میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها	عمق خاک	۱	۰/۱۷	۴/۶۶ *
	تیپ جنگل کاری × عمق خاک	۳	۰/۱۱	۳/۱۷ *
	تیپ جنگل کاری	۳	۱/۴۴	۱۸/۴۷ **
میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها	عمق خاک	۱	۰	۱۷۴/۹۸ **
	تیپ جنگل کاری × عمق خاک	۳	۲/۴۹	۳/۱۸ *
	تیپ جنگل کاری	۳	۰/۰۰۱	۰/۳۹ ^{ns}
بعد فراکتال خاکدانه	عمق خاک	۱	۰/۰۶	۱۷/۲۳ **
	تیپ جنگل کاری × عمق خاک	۳	۰/۰۰۳	۰/۸۷ ^{ns}
	تیپ جنگل کاری	۳	۴۳/۰۵	۳/۴۱ *
ترسیب کربن خاک	عمق خاک	۱	۲۱۶/۸۳	۱۷/۱۹ **
	تیپ جنگل کاری × عمق خاک	۳	۳۸/۹۴	۳/۰۸ *

** معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد؛ * معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد؛ ^{ns} غیر معنی‌دار

همبستگی مثبت معنی‌داری با میانگین‌های وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها و ترسیب کربن خاک در عمق اول نشان داد. همچنین درصد کربن آلی خاک همبستگی منفی با بعد فراکتال خاکدانه‌ها در عمق اول داشت. در عمق دوم فقط همبستگی بین درصد کربن آلی و ترسیب کربن خاک، معنی‌دار بود (جدول ۷).

مقایسه میانگین شاخص‌های مختلف خاک بین تیمارهای مورد مطالعه نشان داد که بیشترین مقدار میانگین‌های وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها و نیز مقدار ترسیب کربن متعلق به خاک تیپ بادام کوهی هستند (جدول ۶).
براساس نتایج به‌دست‌آمده، درصد کربن آلی خاک،

جدول ۶- مقایسه میانگین \pm اشتباه معیار برای میانگین وزنی قطر، میانگین هندسی قطر و بعد فراکتال خاکدانه‌ها و ترسیب کربن خاک در ارتباط با تیپ‌های جنگل کاری و عمق‌های خاک

متغیر	عمق خاک (cm)	بادام کوهی	منطقه شاهد	سرو نقره‌ای	کاج بروسیا
	۱۰-۰	$۱/۲۲ \pm ۰/۰۵^a$	$۰/۹۴ \pm ۰/۱۴^b$	$۰/۴۶ \pm ۰/۰۶^c$	$۰/۸۷ \pm ۰/۰۷^b$
میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (μm)	۲۰-۱۰	$۰/۸ \pm ۰/۰۱^a$	$۱/۰۲ \pm ۰/۴۹^a$	$۰/۴۹ \pm ۰/۰۵^a$	$۰/۵۹ \pm ۰/۰۹^a$
میانگین کل		$۱/۰۱ \pm ۰/۲۲^A$	$۰/۹۸ \pm ۰/۳۴^A$	$۰/۴۷ \pm ۰/۰۵^C$	$۰/۷۳ \pm ۰/۱۶^B$
	۱۰-۰	$۰/۹۸۶ \pm ۰^a$	$۰/۹۸۵ \pm ۰^b$	$۰/۹۸۵ \pm ۰^b$	$۰/۹۸۴ \pm ۰^c$
میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (μm)	۲۰-۱۰	$۰/۹۸۳ \pm ۰^a$	$۰/۹۸ \pm ۰^{bc}$	$۰/۹۸۱ \pm ۰^{ab}$	$۰/۹۷۹ \pm ۰^c$
میانگین کل		$۰/۹۸۵ \pm ۰^A$	$۰/۹۸۳ \pm ۰^B$	$۰/۹۸۳ \pm ۰^B$	$۰/۹۸۱ \pm ۰^C$
	۱۰-۰	$۲/۶۱ \pm ۰/۰۴^b$	$۲/۶۳ \pm ۰/۰۳^a$	$۲/۶۴ \pm ۰/۰۲^a$	$۲/۶۱ \pm ۰/۴۲^b$
بعد فراکتال خاکدانه	۲۰-۱۰	$۲/۵۷ \pm ۰/۰۷^a$	$۲/۵۵ \pm ۰/۰۹^a$	$۲/۵۸ \pm ۰/۰۵^a$	$۲/۵۸ \pm ۰/۶۴^a$
میانگین کل		$۲/۵۹ \pm ۰/۰۶^A$	$۲/۵۹ \pm ۰/۰۸^A$	$۲/۶۱ \pm ۰/۰۵^A$	$۲/۵۹ \pm ۰/۵۴^A$
	۱۰-۰	$۲۷/۲۹ \pm ۴/۴۶^a$	$۱۹/۳۸ \pm ۴/۰۸^a$	$۱۸/۳۸ \pm ۴/۸۴^a$	$۱۷/۹۶ \pm ۲/۳۹^b$
ترسیب کربن خاک (Mg C ha^{-1})	۲۰-۱۰	$۱۵/۶۶ \pm ۳/۷۵^a$	$۱۶/۳۳ \pm ۰/۹۱^a$	$۱۴ \pm ۲/۸۵^a$	$۱۶/۱۹ \pm ۳/۴۴^a$
میانگین کل		$۲۱/۴۸ \pm ۷/۲۹^A$	$۱۷/۸۶ \pm ۳/۱۸^{AB}$	$۱۶/۱۹ \pm ۴/۳۶^B$	$۱۷/۰۸ \pm ۲/۹^B$

حرف‌های متفاوت کوچک انگلیسی در هر سطر بیانگر اختلاف معنی‌دار (حداقل ۹۵ درصد) بین تیمارهای مورد مطالعه در هر کدام از عمق‌های خاک هستند، درحالی‌که حرف‌های متفاوت بزرگ، اختلاف معنی‌دار (حداقل ۹۵ درصد) تیمارها برای میانگین دو عمق خاک را نشان می‌دهند.

جدول ۷- ضریب‌های همبستگی پیرسون بین کربن آلی با مشخصه‌های خاک عمق‌های اول و دوم تیپ‌های مورد مطالعه

متغیر	عمق خاک (cm)	میانگین وزنی قطر خاکدانه	میانگین هندسی قطر خاکدانه	بعد فراکتال	ترسیب کربن خاک
درصد کربن آلی	۱۰-۰	$۰/۶۹^*$	$۰/۵۶^*$	$-۰/۵^*$	$۰/۷^*$
	۲۰-۱۰	$۰/۲۸^{ns}$	$-۰/۳۳^{ns}$	$-۰/۳۷^{ns}$	$۰/۶۲^*$

* همبستگی در سطح اطمینان ۹۹ درصد؛ ^{ns} بدون همبستگی معنی‌دار

بحث

نداشتند، اما به‌طور معنی‌داری بیشتر از خاک منطقه شاهد بودند (جدول ۴). نسبت زیاد خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۲۰۰۰ میکرومتر در تیپ‌های بادام کوهی و کاج بروسیا می‌تواند به‌علت کربن بیشتر ذخیره‌شده در خاک آن‌ها باشد (جدول ۲). کربن آلی خاک از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر خاکدانه سازی، توزیع اندازه و پایداری خاکدانه‌ها محسوب می‌شود (Domínguez et al., 2001; Green et al., 2007). به‌طوری‌که با افزایش کربن آلی ورودی به خاک، خاکدانه‌ها

پژوهش پیش‌رو نشان داد که بیشترین مقدار خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۲۰۰۰ میکرومتر در تیپ‌های بادام کوهی و کاج بروسیا و کمترین مقدار آن در خاک تیپ سرو نقره‌ای مشاهده شدند. همچنین، خاک این تیپ حاوی بیشترین خاکدانه با اندازه ۵۳ تا ۲۵۰ میکرومتر بود. از نظر خاکدانه‌های کوچک‌تر از ۵۳ میکرومتر، خاک سه تیپ جنگل‌کاری‌شده مورد مطالعه با یکدیگر اختلاف معنی‌داری

در طبقه‌های درشت (بیشتر از ۲۰۰۰ میکرومتر) و ریز (کمتر از ۵۳ میکرومتر) را افزایش دهند، اما به‌علت ورود کربن آلی کمتر و کندتر در خاک تیپ سرو نقره‌ای فقط مقدار خاکدانه‌های ریز خاک (کمتر از ۵۳ و ۵۳ تا ۲۵۰ میکرومتر) افزایش یافت. دوم اینکه اختلاف نسبت خاکدانه‌ها در خاک تیپ‌های درختی به دلیل تأثیر مثبت جنگل‌کاری‌ها، بیشتر از منطقه شاهد بود.

نتایج دیگر نشان داد که بیشترین درصد شن در خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۲۰۰۰، ۲۵۰ تا ۲۰۰۰ و ۵۳ تا ۲۵۰ میکرومتر متعلق به خاک تیپ کاج بروسیا و در خاکدانه‌های کوچک‌تر از ۵۳ میکرومتر متعلق به خاک تیپ سرو نقره‌ای بود. بنابراین می‌توان گفت از نظر طبقه اندازه‌های شن، خاک تیپ‌های کاج بروسیا و سرو نقره‌ای نسبت به تیپ‌های دیگر درختی از پایداری خاکدانه، کربن آلی و به تبع آن از ترسیب کربن کمتری برخوردار هستند. چراکه کربن آلی خاک با مقدار ذرات شن خاک در ارتباط است به‌طوری‌که خاک‌های با شن بیشتر، دارای کربن آلی کمتری می‌باشند (Powers & Schlesinger, 2002). همچنین مقادیر بالای شن با افزایش تردی و شکنندگی خاکدانه‌ها باعث کاهش پایداری آن‌ها می‌شود (Xu & Tabatabaei, 2010).

میانگین‌های وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها از شاخص‌های توزیع اندازه خاکدانه‌های خاک هستند. طبق نتایج به‌دست‌آمده، بیشترین میانگین شاخص‌های مذکور در خاک تیپ بادام کوهی مشاهده شد (جدول ۶). به دلیل ارتباط مستقیم بین مقدار ماده آلی خاک و میانگین‌های وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌های خاک (Chaney & Swift, 1984) و نتایج همبستگی انجام‌شده در پژوهش پیش‌رو (جدول ۷)، مقدار زیادتر میانگین‌های وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها در تیپ بادام کوهی نشان‌دهنده ساختمان بهتر و خاکدانه‌های پایدارتر خاک است (Chenu *et al.*, 2000; Liu *et al.*, 2013) و می‌تواند به‌علت ماده آلی بیشتر در خاک این تیپ باشد (جدول ۲). افزایش میانگین‌های وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها با کاهش تکه‌تکه شدن خاکدانه‌ها

بزرگ‌تر و پایدارتر و حاصلخیزی خاک، بیشتر می‌شود (Domínguez *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2013; Mao *et al.*, 2014). از طرفی، خاکدانه‌های بزرگ، ظرفیت بیشتری برای ذخیره کربن نسبت به خاکدانه‌های ریزتر دارند، درحالی‌که کربن آلی خاک در خاکدانه‌های کوچک، پایدارتر و قدیمی‌تر است (Six *et al.*, 1998; Onweremadu *et al.*, 2010)، بنابراین می‌توان چنین استنباط کرد که خاک تیپ‌های بادام کوهی و کاج بروسیا به‌واسطه خاکدانه‌های بزرگ‌تر نسبت به خاک منطقه شاهد و تیپ سرو نقره‌ای، پایدارتر و حاصلخیزتر هستند و توانایی بیشتری در ترسیب کربن دارند. ضمن آنکه در هر سه تیپ جنگل‌کاری به‌علت وفور خاکدانه‌های ریز (کمتر از ۵۳ میکرومتر)، کربن آلی خاک نسبت به منطقه شاهد، پایدارتر است.

مقدار کربن آلی موجود در خاک، نتیجه توازن بین ورودی کربن حاصل از تجزیه لاش‌برگ و ریشه با خروجی کربن از خاک است. به‌طور معمول در مراحل اولیه توسعه جنگل‌کاری (تا حدود سن ۳۰ سالگی) به دلیل فرایند تنفس، کربن بیشتری از خاک خارج می‌شود و تعادل مذکور، در نتیجه نسبت کمتر ورودی کربن به خروجی آن، دیرتر به‌دست می‌آید (Arevalo *et al.*, 2009). سپس، با افزایش سن جنگل‌کاری‌ها، کربن آلی خاک افزایش می‌یابد و تا رسیدن به یک تعادل پایدار ادامه دارد. این فرایند در گونه‌های مختلف، متفاوت است (Hu *et al.*, 2008) و به سرعت تجزیه، کیفیت لاش‌برگ و شرایط محیطی بستگی دارد (Yang *et al.*, 2009). سرعت تجزیه لاش‌برگ گونه‌های پهن‌برگ به‌علت نسبت C/N کمتر از سوزنی‌برگان، بیشتر است (Santonja *et al.*, 2015)، بنابراین بازگشت کربن آلی از لاش‌برگ بادام کوهی به خاک، سریع‌تر از سرو نقره‌ای رخ داد. برعکس، برگ سرو نقره‌ای با وجود سطح تاج‌پوشش بیشتر، به‌علت C/N و وجود مواد رزینی و فنلی زیادتر، دیرتر تجزیه می‌شود (Tiessen *et al.*, 1994). براین‌اساس، نتایج فوق از دو جنبه، قابل‌توجه هستند. اول اینکه تیپ‌های بادام کوهی و کاج بروسیا با توجه به ورود کربن آلی بیشتر و سریع‌تر توانستند هم‌زمان نسبت خاکدانه‌ها

نقره‌ای و منطقه شاهد، کربن آلی ورودی به خاک را افزایش دادند. در نتیجه، خاکدانه‌های خاک آن‌ها، بزرگ‌تر بود. همچنین، بادام کوهی به علت ورود کربن آلی بیشتر به خاک توانست میانگین‌های وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها و نیز ترسیب کربن خاک را به طور معنی‌داری افزایش دهد.

منابع مورد استفاده

- Arevalo, C.B.M., Bhatti, J.S., Chang, S.X. and Sidders, D., 2009. Ecosystem carbon stocks and distribution under different land-uses in north central Alberta, Canada. *Forest Ecology and Management*, 257(8): 1776-1785.
- Barthès, B.G., Kouakoua, E., Larré-Larrouy, M.C., Razafimbelo, T.M., de Luca, E.F., Azontonde, A. and Feller, C.L., 2008. Texture and sesquioxide effects on water-stable aggregates and organic matter in some tropical soils. *Geoderma*, 143(1-2): 14-25.
- Bronick, C.J. and Lal, R., 2005. Manuring and rotation effects on soil organic carbon concentration for different aggregate size fractions on two soils in northeastern Ohio, USA. *Soil and Tillage Research*, 81(2): 239-252.
- Caron, J., Espindola, C.R. and Angers, D.A., 1996. Soil structural stability during rapid wetting: Influence of land use on some aggregate properties. *Soil Science Society of America Journal*, 60(3): 901-908.
- Chaney, K. and Swift, R.S., 1984. The influence of organic matter on aggregate stability in some British soils. *Journal of Soil Science*, 35(2): 223-230.
- Chen, G., Gao, Z., Zu, L., Tang, L., Yang, T., Feng, X. and Shi, F., 2017. Soil aggregate characteristics and stability of soil carbon stocks in a *Pinus tabulaeformis* plantation. *New Forests*, 48: 837-853.
- Chenu, C., Le Bissonnais, Y. and Arrouays, D., 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, 64(4): 1479-1486.
- Derner, J.D. and Schuman, G.E., 2007. Carbon sequestration and rangelands: a synthesis of land management and precipitation effects. *Journal of soil and water conservation*, 62(2): 77-85.
- Dianati Tilaki, Gh. A., Naghipour Borj, A.A., Tavakkoli, H., Haidarian Aghakhani, M. and Saeid Afkhamooshara, M.R., 2009. Influence of exclosure on carbon sequestration of soil and plant biomass in semi arid rangelands of North Khorasan province. *Journal of Rangeland*, 13(4): 668-679 (In Persian).

سبب افزایش پایداری آن‌ها (Liu *et al.*, 2013) در خاک تیپ بادام کوهی نسبت به تیپ‌های دیگر می‌شود. میانگین‌های کمتر وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها در تیپ‌های دیگر و منطقه شاهد نیز می‌توانند به علت فقر خاک از نظر مواد آلی باشند.

نتایج آنالیز واریانس نشان داد که بعد فراکتال خاکدانه‌ها بین خاک تیپ‌های مورد مطالعه، تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول‌های ۵ و ۶). به‌طور کلی، مقدار کم ($D < 2$) و زیاد ($D > 3$) بعد فراکتال، سؤال‌برانگیز است. براساس نتایج پژوهش پیش‌رو، خاکدانه‌ها در تیمارهای مختلف در یک دامنه نرمال (دو تا سه) از نظر بعد فراکتالی قرار داشتند. با توجه به عدم وجود بعد فراکتال بیشتر از سه در این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که ذرات خرد شده به آرایش اولیه خود شباهت دارند (Parent *et al.*, 2011).

ترسیب کربن در خاک تیپ بادام کوهی نسبت به تیمارهای دیگر به‌طور معنی‌داری بیشتر بود (جدول ۶). این متغیر تحت تأثیر کربن آلی و وزن مخصوص ظاهری خاک قرار دارد (رابطه ۴). با توجه به اینکه خاک تیپ‌های مورد مطالعه در پژوهش پیش‌رو از نظر وزن مخصوص ظاهری، اختلاف معنی‌داری نداشتند، درصد کربن آلی بیشتر در خاک تیپ بادام کوهی می‌تواند مهم‌ترین عامل ترسیب کربن بیشتر در خاک آن باشد. یکی دیگر از دلایل این موضوع به بزرگ بودن خاکدانه‌های خاک در این تیپ برمی‌گردد. زیرا کربن آلی و ترسیب کربن در این خاکدانه‌ها، بیشتر است (Onweremadu *et al.*, 2010). در تأیید این نتایج، Pilehvar و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که در کوتاه‌مدت، گونه‌های پهن‌برگ در مقایسه با سوزنی‌برگان سبب ترسیب کربن بیشتری در خاک می‌شوند. به‌طور کلی، گونه‌های پهن‌برگ نسبت به سوزنی‌برگان، پتانسیل بیشتری برای ترسیب کربن دارند (Niu *et al.*, 2009).

براساس یافته‌های پژوهش پیش‌رو، جنگل‌کاری‌های بادام کوهی و کاج بروسیا در کوتاه‌مدت با افزایش کربن آلی خاک سبب بهبود پایداری خاکدانه‌ها و ویژگی‌های خاک شدند، بنابراین می‌توان گفت که این دو گونه، سریع‌تر از سرو

- Mao, R., Zhang, X.H. and Meng, H.N., 2014. Effect of *Suaeda salsa* on soil aggregate-associated organic carbon and nitrogen in tidal salt marshes in the Liaohe Delta, China. *Wetlands*, 34(1): 189-195.
- Niu, D., Wang, S. and Ouyang, Z., 2009. Comparisons of carbon storages in *Cunninghamia lanceolata* and *Michelia macclurei* plantations during a 22-year period in southern China. *Journal of Environmental Sciences*, 21(6): 801-805.
- Nosoetto, M.D., Jobbágy, E.G. and Paruelo, J.M., 2006. Carbon sequestration in semi-arid rangelands: Comparison of *Pinus ponderosa* plantations and grazing exclusion in NW Patagonia. *Journal of Arid Environment*, 67(1): 142-156.
- Onweremadu, E., Osuji, G., Eshett, T., Unamba-Oparah, I. and Onwuliri, C., 2010. Soil carbon sequestration in aggregate size of a forested Isohyperthermic Arenic Kandiodult. *Thai Journal of Agricultural Science*, 43(1): 9-15.
- Parent, L.E., Parent, S.E., Kätker, T. and Egozcue, J.J., 2011. Fractal and compositional analysis of soil aggregation. *Proceedings of the 4th International Workshop on Compositional Data Analysis*. Girona, Spain, 13 May 2011: 14p.
- Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R. and Wagner, F., 2003. *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Published by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC, Hayama, Japan, 590p.
- Pilehvar, B., Jafari Sarabi, H. and Mirazadi Z., 2017. Soil carbon sequestration compression in plantations with different species in Makhmalkooh forest park. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 29(4): 717-727 (In Persian).
- Powers, J.S. and Schlesinger, W.H., 2002. Relationships among soil carbon distributions and biophysical factors at nested spatial scales in rain forests of northeastern Costa Rica. *Geoderma*, 109(3-4): 165-190.
- Sagheb-Talebi, K.h., Sajedi, T. and Yazdian, F., 2005. *Forests of Iran*. Published by Research Institute of Forests and Rangelands, Tehran, 56p.
- Santonja, M., Baldy, V., Fernandez, C., Balesdent, J. and Gauquelin, T., 2015. Potential shift in plant communities with climate change: Outcome on litter decomposition and nutrient release in a Mediterranean oak forest. *Ecosystems*, 18(7): 1253-1268.
- Six, J., Elliott, E.T., Paustian, K. and Doran, J.W., 1998. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland
- Díaz-Zorita, M., Perfect, E. and Grove, J.H., 2002. Disruptive methods for assessing soil structure. *Soil and Tillage Research*, 64(1-2): 3-22.
- Domínguez, J., Negrín, M.A. and Rodríguez, C.M., 2001. Aggregate water-stability, particle-size and soil solution properties in conducive and suppressive soils to Fusarium wilt of banana from Canary Islands (Spain). *Soil Biology and Biochemistry*, 33(4-5): 449-455.
- Fang, S., Xue, J. and Tang, L., 2007. Biomass production and carbon sequestration potential in poplar plantations with different management patterns. *Journal of Environmental Management*, 85(3): 672-679.
- Green, V.S., Stott, D.E., Cruz, J.C. and Curi, N., 2007. Tillage impacts on soil biological activity and aggregation in a Brazilian Cerrado Oxisol. *Soil and Tillage Research*, 92(1-2): 114-121.
- Gregory, A.S., Bird, N.R.A., Watts, C.W. and Whitmore, A.P., 2012. An assessment of a new model of dynamic fragmentation of soil with test data. *Soil and Tillage Research*, 120: 61-68.
- Guo, L.B. and Gifford, R.M., 2002. Soil carbon stocks and land use change: A Meta analysis. *Global Change Biology*, 8(4): 345-360.
- Hu, Y.L., Zeng, D.H., Fan, Z.P., Chen, G.S., Zhao, Q. and Pepper, D., 2008. Changes in ecosystem carbon stocks following grassland afforestation of semiarid sandy soil in the southeastern Keerqin Sandy Lands, China. *Journal of Arid Environments*, 72(12): 2193-2200.
- Hwang, S.I., 2004. Effect of texture on the performance of soil particle-size distribution models. *Geoderma*, 123(3-4): 363-371.
- Jamshidnia, Z., Abrari Vajari, K., Sohrabi, A. and Veiskarami, G.h., 2016. Flora and plant species diversity in coniferous and deciduous plantations (Case study: plantation of Remela, Lorestan). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 24(2): 249-259 (In Persian).
- Lehmann, J. and Kleber, M., 2015. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528: 60-68.
- Liu, Y., Zha, T., Wang, Y. and Wang, G., 2013. Soil aggregate stability and soil organic carbon characteristics in *Quercus variabilis* and *Pinus tabulaeformis* plantations in Beijing area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24(3): 607-613 (In Chinese).
- Malasadi, E., Pilevar, B. and Mirazadi, Z., 2021. Seasonal nutrients retranslocation patterns in needles and twigs of *Pinus brutia* Ten. *Journal of Forest Research and Development*, 6(4): 645-659 (In Persian).

- Xu, G.M. and Tabatabaei, S.H., 2010. Introducing some PTF for soil physical properties in bank of Yangtze River, Nanjing District. *Journal of Research in Agricultural Science*, 6(2): 65-73.
- Yang, Y., Guo, J., Chen, G., Yin, Y., Gao, R. and Lin, C., 2009. Effects of forest conversion on soil labile organic carbon fractions and aggregate stability in subtropical China. *Plant and soil*, 323(1): 153-162.
- Zhang, M., Zou, X. and Schaefer, D.A., 2010. Alteration of soil labile organic carbon by invasive earthworms (*Pontoscolex corethrurus*) in tropical rubber plantations. *European Journal of Soil Biology*, 46(2): 74-79.
- Zobeck, T.M., Popham, T.W., Skidmore, E.L., Lamb, J.A., Merrill, S.D., Lindstrom, M.J. and Yoder, R.E., 2003. Aggregate-mean diameter and wind-erodible soil predictions using dry aggregate-size distributions. *Soil Science Society of America Journal*, 67(2): 425-436.
- soils. *Soil Science Society of America Journal*, 62(5): 1367-1377.
- Skaggs, T.H., Arya, L.M., Shouse, P.J. and Mohanty, B.P., 2001. Estimating particle-size distribution from limited soil texture data. *Soil Science Society of America Journal*, 65(4): 1038-1044.
- Tate, K.R., Ross, D.J., Saggarr, S., Hedley, C.B., Dando, J., Singh, B.K. and Lambie, S.M., 2007. Methane uptake in soils from *Pinus radiata* plantations, a reverting shrubland and adjacent pastures: Effects of land-use change, and soil texture, water and mineral nitrogen. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(7): 1437-1449.
- Tiessen, H., Cuevas, E. and Chacon, P., 1994. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. *Nature*, 371: 783-785.
- Wang, F., Zhu, W. and Chen, H., 2016. Changes of soil C stocks and stability after 70-year afforestation in the Northeast USA. *Plant and Soil*, 401: 319-329.

Effect of reforestation by broadleaf and coniferous species on aggregate stability and soil carbon sequestration in the Rimaleh, Khorramabad, Iran

A. Zeidi Joodaki ¹, B. Pilehvar ^{2*} and H. Jafari Sarabi ³

1- M.Sc. Student of Silviculture and Forest Ecology, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran

2*- Corresponding author, Associate Prof., Department of Forestry, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran. E-mail: pilehvar.b@lu.ac.ir

3- Ph.D. of Silviculture and Forest Ecology, Lorestan Natural Resources and Watershed Management Administration, Khorramabad, Iran

Received: 25.02.2021

Accepted: 06.07.2021

Abstract

This study investigated the effects of reforestation by native broadleaf and exotic coniferous species on some soil properties at Rimaleh plantations, Khorramabad County, Iran. The experiment was performed by using a completely randomized design with Arizona cypress (*Cupressus arizonica* Greene), Turkish pine (*Pinus brutia* Ten.), wild almond (*Amygdalus scoparia* Spach) and control treatments in four replications. Each replication consisted of a 20 × 20 m² plot. Diameter at breast height, canopy cover, and tree height were measured at each plot. Two combined soil specimens were sampled at the two distinct 0-10, and 10-20 cm depths in each treatment replication. The two-way ANOVA was used to compare the ratio of aggregate size and sand proportion, fractal dimension, the mean weight diameter (MWD) of aggregates, geometric mean diameter (GMD) of aggregates, and carbon sequestration among tree species and sampling depths. Results showed that wild almond and Turkish pine plantations play a major role in the development and sustainability of both coarse (more than 2000 μm) and fine (less than 53 μm) aggregates. The Arizona cypress plantations only led to increase of fine aggregates (53-250 and less than 53 μm). A significant increase also was observed in the MWD and GMD of aggregates, and the carbon sequestration in the wild almond plantation soil. In a short time, the wild almond and Turkish pine plantations added more organic carbon to the soil and improved both the soil properties and the stability of aggregates in comparison to the Arizona cypress and control treatment.

Keywords: Forest soil, fractal dimension, geometric mean diameter of aggregates, Lorestan Province, mean weight diameter of aggregates.