

آماده انتشار

اثرات کاج تهران (*Pinus eldarica* Medw) بر برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و کیفیت خاک (مطالعه موردی: شهرستان‌های سیروان و ایوان)

یاسم خانمحمیدیان^۱، جواد میرزایی^{۲*}، مهدی حیدری^۳، مهناز کرمان^۴

^۱ دانشجوی دکتری علوم زیستی جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

^۲ دانشیار گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

^۳ استاد تمام گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

^۴ دکتری علوم زیستی جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۲

نویسنده مسئول: j.mirzaei@ilam.ac.ir

علمی- پژوهشی

چکیده

سابقه و هدف: نهال‌کاری با گونه‌ی کاج تهران (*Pinus eldarica* Medw) موجب تغییر در ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و شاخص کیفیت خاک می‌شود. با این حال، میزان این تغییرات، تحت تأثیر عواملی همچون اقلیم، سن کاشت و عمق خاک متفاوت است. هدف پژوهش حاضر، بررسی اثرات نهال‌کاری کاج در دوره‌های ۲۰ ساله و ۳۰ ساله بر ویژگی‌های خاک است.

مواد و روش‌ها: بر اساس شاخص دومارتن، دو منطقه نماینده‌ی اقلیم‌های نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای در استان ایلام انتخاب شدند. برای انجام این تحقیق، دو توده جنگل‌کاری‌شده ۲۰ و ۳۰ ساله از گونه کاج تهران استفاده شد. نمونه‌برداری خاک به صورت کاملاً تصادفی از هر منطقه در دو عمق ۱۰-۰ و ۲۰-۱۰ سانتی‌متری و با پنج تکرار انجام شد. برای تحلیل داده‌ها، از آنالیز واریانس سه‌طرفه (GLM) در قالب طرح فاکتوریل به منظور تعیین اثرات معنی‌دار تیمارها و اثرات متقابل آن‌ها بر ویژگی‌های فیزیکی (بافت خاک، چگالی ظاهری و رطوبت خاک) و شیمیایی (pH، هدایت الکتریکی، کربن آلی، نیتروژن کل، پتاسیم قابل جذب، فسفر قابل جذب و آهنک) و شاخص کیفیت خاک استفاده شد. مقایسه‌ی میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام گرفت. از آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای بررسی روابط میان ویژگی‌های خاک و تبیین الگوهای تغییر بین تیمارهای مختلف استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که عمق خاک بر میزان رس، شن، رطوبت و چگالی ظاهری تأثیر معنی‌داری داشت. در حالی که اقلیم منطقه تنها بر رطوبت خاک و سن بر رطوبت و چگالی ظاهری از نظر آماری معنی‌دار بود. به طوری که رطوبت خاک در جنگل‌کاری‌های ۳۰ ساله حدود ۱/۵ برابر جنگل‌کاری‌های ۲۰ ساله بود. همچنین، اقلیم بر میزان نیتروژن کل، فسفر، پتاسیم و شاخص کیفیت خاک اثر معنادار داشت. سن و عمق خاک بر اکثر ویژگی‌های شیمیایی اثر قابل توجهی داشتند. علاوه بر این، اثر متقابل سن و عمق خاک بر میزان کربن آلی، نیتروژن کل، پتاسیم قابل جذب و شاخص کیفیت خاک دارای تفاوت معنادار بود. میزان کربن آلی در لایه‌ی سطحی خاک در توده ۳۰ ساله ۳ تا ۳/۵ برابر، نیتروژن کل ۲/۵ تا ۳ برابر، پتاسیم قابل جذب ۱/۸ تا ۱/۵ برابر، شاخص کیفیت خاک ۱/۱۵ و ۱/۱۴ برابر و هدایت الکتریکی کمتر از جنگل‌کاری‌های ۲۰ ساله بود. این تفاوت‌ها به ترتیب در مناطق نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای مشاهده شدند.

نتیجه‌گیری: نهال‌کاری با گونه‌ی غیربومی کاج تهران در اراضی تخریب‌یافته، نقش مهمی در حفاظت خاک، حفظ منابع آب، ذخیره‌ی کربن و بازسازی چشم‌انداز دارد. اگرچه کیفیت خاک در اقلیم مدیترانه‌ای به دلیل ورودی مواد آلی بالاتر، شرایط آب‌وهوایی مطلوب‌تر و ظرفیت نگه‌داری آب بهبود یافته است، اما در منطقه‌ی نیمه‌خشک نیز روند تدریجی بهبود ویژگی‌های خاک در توده‌های مسن‌تر مشاهده می‌شود. این توده‌ها با افزایش مقادیر کربن و نیتروژن و کاهش هدایت الکتریکی، نقش مؤثری در بازسازی و پایداری خاک در شرایط محدودیت آبی دارند. از این رو، تداوم طرح‌های نهال‌کاری با گونه‌های غیربومی کاج در اراضی تخریب یافته، باید بر مبنای پایش بلندمدت همراه با مطالعات مقایسه‌ای با گونه‌های بومی متمرکز شود تا بتواند به مدیریت پایدار منابع طبیعی و برقراری تعادل اکولوژیکی منجر شود.

واژه‌های کلیدی: استان ایلام، اقلیم، جنگل‌کاری، جنگل‌های زاگرس، عمق خاک

مقدمه

بیش از یک‌سوم از سطح خشکی‌های کره‌ی زمین، دارای اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک می‌باشد. احیاء و بازسازی اراضی تخریب‌یافته این مناطق با استفاده جنگل‌کاری گونه‌های بومی و غیربومی از گذشته تاکنون از اهمیت بالایی برخوردار بوده است (۱). در راستای احیای اراضی تخریب‌یافته و اجرای طرح‌های جنگل‌کاری در ایران، در گذشته نیز جنگل‌کاری‌هایی با گونه‌های مختلف با اولویت گونه‌های بومی که با شرایط اکولوژیکی محلی سازگار بوده و تنوع زیستی را حفظ می‌کنند، انجام شده است؛ اما در موارد خاص مانند اراضی شدیداً تخریب‌یافته که گونه‌های بومی استقرار ضعیفی دارند، گونه‌های غیربومی سوزنی‌برگ مانند انواع کاج‌ها در زمانی که موفقیت استقرار آنها بالا بوده، اهداف اکوسیستم را برآورده کنند و احتمال تخریب بیشتر زمین کم باشد، به عنوان گزینه‌های مکمل استفاده شده است (۲). این گونه‌ها با اهدافی چون توسعه‌ی فضاهای سبز شهری، کاهش آلودگی و بهبود شرایط

زیست‌محیطی کاشته شده‌اند (۳). کاج تهران به دلیل رشد سریع، مقاومت بالا در برابر نوسانات دمایی، مناسب بودن برای اقلیم مدیترانه‌ای و نیمه‌خشک، مقاومت به کم‌آبی و سازگاری با شرایط سخت، گزینه مناسبی برای بازسازی اراضی تخریب‌یافته ایران شناخته شده است (۴، ۵).

در برخی پژوهش‌ها، تأثیر جنگل‌کاری سوزنی‌برگان بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در مقایسه با پهن‌برگان مورد بررسی قرار گرفته است. حسینی و حسینی (۲۰۱۴)، گزارش کردند که حاصلخیزی خاک در توده‌های سوزنی‌برگ نسبت به جنگل طبیعی بلوط کاهش یافته است، به‌طوری‌که مقدار pH حدود ۳-۵/۰ درصد، کربن آلی ۲۰-۴ درصد، نیتروژن کل ۳۶-۲۶ درصد، فسفر آلی ۴۷-۵۵ درصد و پتاسیم قابل‌جذب ۲۲-۱۰ درصد کمتر از توده‌های طبیعی بوده است (۶). همچنین مهرنوش و همکاران (۲۰۲۳) بیشترین مقدار کربن آلی و کمترین میزان فسفر و ظرفیت تبادل کاتیونی را در توده‌های سوزنی‌برگ نسبت به پهن‌برگان گزارش کردند، درحالی‌که تفاوت معنی‌داری در میزان pH و هدایت الکتریکی مشاهده نشد (۷). Karamian و همکاران (۲۰۲۳) نیز کاهش درصد رطوبت، پتاسیم و فسفر و افزایش درصد آهک و چگالی ظاهری در خاک جنگل‌کاری‌شده با سوزنی‌برگان (کاج تهران و سرو نقره‌ای) نسبت به پهن‌برگان را نتیجه گرفتند (۸).

باین‌حال، تأثیر جنگل‌کاری تنها به نوع گونه‌ی درختی محدود نمی‌شود، ویژگی‌های منطقه‌ی و سن توده‌های جنگل‌کاری‌شده نیز بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تأثیرگذارند، به‌ویژه آن‌که این اثرات در عمق‌های مختلف خاک می‌تواند متفاوت باشد. برای نمونه، در بررسی توده‌های کاج در اقلیم مدیترانه‌ای مشخص شد که توده‌های جوان‌تر، میزان مواد آلی، رطوبت خاک، ظرفیت نگه‌داری آب و لاشریزه کمتری نسبت به توده‌های مسن‌تر دارند (۹) همچنین pH خاک در جنگل‌کاری‌های ۲۰ ساله کاج، بالاتر از جنگل‌های ۱۰، ۴۰ و ۶۰ ساله گزارش شده، درحالی‌که میزان فسفر با افزایش سن جنگل افزایش و نیتروژن در جنگل‌های ۲۰ ساله کاهش یافته و سپس در جنگل‌های ۴۰ ساله افزایش پیدا کرده است. در این پژوهش، سن میانی جنگل (۲۰ تا ۴۰ سال) به‌عنوان نقطه‌ی عطف در تغییر ویژگی‌های خاک معرفی شد (۱۰) از سوی دیگر، عمق خاک نیز در توزیع عناصر غذایی و تجمع مواد آلی نقش مؤثری دارد به‌گونه‌ای که مطالعات متعدد کاهش مقدار کربن آلی و نیتروژن کل را با افزایش عمق خاک گزارش کرده‌اند (۱۱). Marín و همکاران (۲۰۱۹) نیز بیان کردند که تأثیر جنگل‌کاری با گونه‌ی کاج به عواملی چون عمق نمونه‌برداری و ویژگی‌های کاشت وابسته است (۱۲).

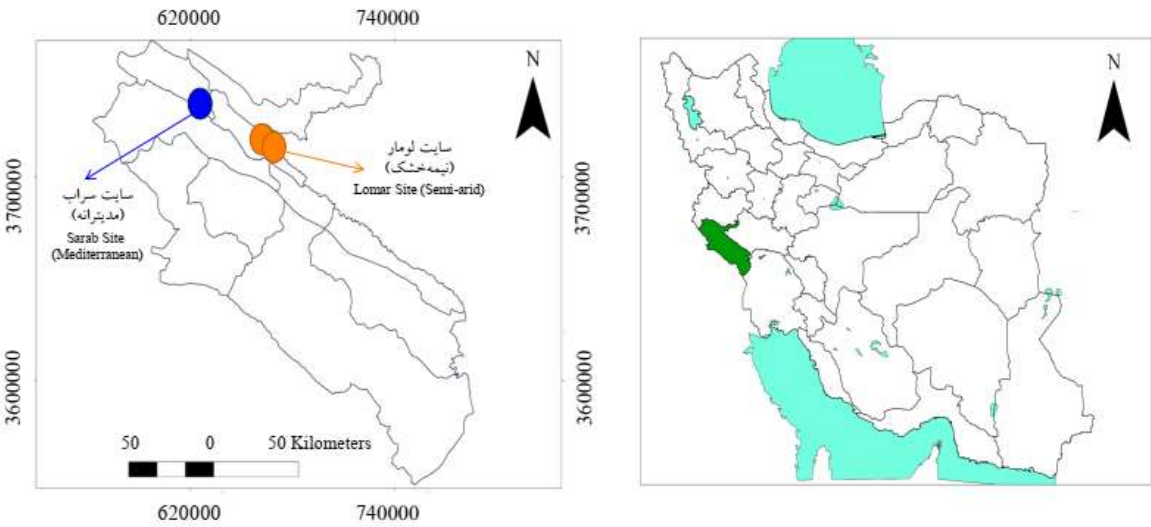
گرچه برخی از مطالعات جهانی از جمله Tudor و همکاران (۲۰۲۵) با تحلیل ۲۸۱ مقاله منتشر شده، نقش مثبت جنگل‌کاری گونه‌های کاج بر خدمات اکوسیستمی از جمله کربن، ذخیره‌ی آب، حفاظت خاک و تنوع زیستی را تأیید کرده‌اند اما این مقالات عمدتاً از کشورهای آمریکا، چین و اسپانیا بوده‌اند (۱۳) و سهم کشور ایران با وجود جنگل‌کاری‌های غیربومی، از این نوع مطالعات بسیار ناچیز بوده و عملاً در مطالعات بین‌المللی نادیده گرفته شده است. بر این اساس، پژوهش حاضر بخشی از خلأ تحقیقاتی در مورد اثر جنگل‌کاری گونه کاج تهران (*Pinus eldarica* Medw.) در مناطق تخریب‌یافته در سنین مختلف (۲۰ و ۳۰ ساله) و عمق‌های متفاوت (۱۰-۰ و ۲۰-۱۰ سانتی‌متری) را به‌صورت پژوهشی جامع در اقلیم‌های نیمه‌خشک و مدیترانه جنگل‌های زاگرس مورد بررسی قرار داد. در این مطالعه، شاخص کیفیت خاک به‌عنوان ابزاری مؤثر برای ارزیابی و پایش وضعیت خاک در اکوسیستم‌های جنگلی مورد استفاده قرار گرفت و بر مبنای ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محاسبه شد. فرضیه‌ی اصلی پژوهش آن است که کیفیت و حاصلخیزی خاک در اقلیم مدیترانه‌ای و توده‌های ۳۰ ساله به‌طور معنی‌داری بالاتر از منطقه‌ی نیمه‌خشک و توده‌های ۲۰ ساله خواهد بود، همچنین انتظار می‌رود لایه‌ی سطحی خاک (عمق ۱۰-۰ سانتی‌متر) نسبت به عمق پایین‌تر از نظر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی تفاوت معنی‌داری نشان می‌دهد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: این پژوهش در استان ایلام و در دو شهرستان سیروان (رویشگاه لومار) و ایوان (رویشگاه سراب) با اقلیم متفاوت، انجام شد. بر اساس شاخص دومارتن، مناطق مورد بررسی در دو طبقه‌ی اقلیمی شامل نیمه‌مرطوب مدیترانه‌ای (شهرستان ایوان) و نیمه‌خشک (شهرستان سیروان) طبقه‌بندی شدند (شکل ۱). از نظر زمین‌شناسی، هر دو منطقه دارای سازند آسماری با سنگ مادر آهکی می‌باشند (۱۴). ویژگی‌های اقلیمی، فیزیوگرافی و خصوصیات جنگل‌کاری این مناطق در جدول ۱ ارائه شده است. عملیات جنگل‌کاری با گونه‌ی کاج تهران (*Pinus eldarica* Medw.) هر دو منطقه در سال‌های ۱۳۷۲ و ۱۳۸۲ با فاصله‌ی کاشت ۵ × ۵ متر اجرا شد. در زمان نمونه‌برداری (سال ۱۴۰۲)، توده‌ها به ترتیب دارای سنین ۳۰ و ۲۰ ساله بودند.

جدول ۱- ویژگی‌های اقلیمی، فیزیوگرافی و جنگل‌کاری در مناطق مورد مطالعه (۱۵)

منطقه	اقلیم	مساحت	میانگین شیب	ارتفاع از	بارندگی سالانه	حداقل دما	حداکثر دما	میانگین دمای سالانه
Site	Climate	جنگل‌کاری	(درصد)	سطح دریا	(میلی‌متر)	(درجه سانتی‌گراد)	(درجه سانتی‌گراد)	Mean Annual Temperature (C°)
		(هکتار)	Average slope (%)	(متر)	Annual Precipitation (mm)	Minimum Temperature (C°)	Maximum Temperature (C°)	
		Area (ha)		Elevation (m)				
سراب	نیمه‌مرطوب	28	< 10	1500	654	1.2	37.7	17.2
Sarab	(مدیترانه‌ای)							
	Semi-humid (Mediterranean)							
لومار	نیمه‌خشک	15	< 10	950	387	2.6	44.1	21.4
Lomar	Semi-arid							



شکل ۱- موقعیت مناطق مورد مطالعه در ایران و استان ایلام

Figure 1. The location of the study areas in Iran and Ilam Province

روش نمونه‌برداری: برای انجام این تحقیق، دو منطقه اقلیمی متفاوت (مدیترانه و نیمه‌خشک) که در هر منطقه، توده جنگل‌کاری شده ۲۰ و ۳۰ ساله با گونه کاج وجود داشت، انتخاب شد. در هر کدام از این توده‌ها، نمونه‌های خاک از زیر تاج درختان (به فاصله یک متر از تنه) به‌صورت تصادفی از دو عمق ۱۰-۰ و ۲۰-۱۰ سانتی‌متری و در قالب طرح فاکتوریل، در تابستان ۱۴۰۴ تهیه گردید. نمونه‌های خاک پس از انتقال به آزمایشگاه، در دمای محیط هواخشک و سپس کوبیده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. بافت خاک با روش هیدرومتری، رطوبت اشباع خاک با روش وزنی نسبت خاک اشباع از آب به خاک خشک‌شده در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت ارزیابی شد. چگالی ظاهری خاک با روش پارافین و استفاده از سه کلوخه‌ی دست‌نخورده از هر نمونه خاک، کربن آلی به روش اکسیداسیون دی‌کرومات و تیتراسیون، نیتروژن کل به روش کج‌لدال، آهک با روش تیتراسیون برگشتی با سود پتاسیم قابل جذب با عصاره‌گیری با استات آمونیوم با pH=۷ و فلیم‌فوتومتر، فسفر قابل جذب به روش اولسن با عصاره‌گیری بی‌کربنات سدیم و اسپکتروفوتومتر، pH با pH متر (نسبت ۲ به ۱ آب) و هدایت الکتریکی با الکترومتر اندازه‌گیری شدند (۱۶).

شاخص کیفیت خاک با ایجاد مجموعه حداقل داده‌ها (MDS) از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و با استفاده از روابط ۱ تا ۳

(۱۷) محاسبه شد.

$$N(x)=\begin{cases} 1 & X < L \\ 1 - 0.9 \frac{X-L}{U-L} & L \leq X \leq U \\ 0.1 & X > U \end{cases} \quad \text{بخت} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$M(x)=\begin{cases} 0.1 & X < L \\ 0.9 \frac{X-L}{U-L} + 0.1 & L \leq X \leq U \\ 1 & X > U \end{cases} \quad \text{بیشتر - بهتر} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$F(x)=\begin{cases} 0.1 & X < L \\ 0.9 \frac{X-L}{U-L} + 0.1 & L < X < U \\ 1 & U < X < L \\ 1 - 0.9 \frac{X-L}{U-L} & L < X < U \\ 0.1 & X > U \end{cases} \quad \text{سطح بهینه} \quad \text{رابطه ۳}$$

در روابط بالا، X مقدار اندازه‌گیری شده برای یک ویژگی خاک، L حد پایین آستانه، U حد بالای آستانه و N(x)، F(x) و M(x) توابع امتیازدهی استاندارد برای حد بالا، پایین و بهینه هستند که به ترتیب از ۰/۱ تا ۱ متغیر است. در نهایت، شاخص کیفیت خاک SQI برای هر نمونه‌برداری به صورت جمع وزنی زیر محاسبه می‌شود:

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i \times N_i \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن W_i امتیاز استاندارد شده و وزن برای هر ویژگی خاک، N_i امتیاز هر ویژگی خاک که از تابع امتیازدهی خطی به دست می‌آید و n تعداد ویژگی‌های خاک است.

تجزیه و تحلیل آماری: برای بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و برای بررسی همگنی واریانس‌ها از

آزمون لون استفاده شد. طرح آماری فاکتوریل [دو سطح برای مناطق اقلیمی (مدیترانه و نیمه‌خشک) × دو کلاس سنی (۲۰ و ۳۰

ساله) × دو عمق (۱۰-۰ و ۲۰-۱۰ سانتی‌متر) × ۵ تکرار] انجام گرفت. سپس، به منظور تعیین اثرات اصلی شامل منطقه، سن

جنگل کاری و عمق خاک و نیز اثرات متقابل آن‌ها از تحلیل واریانس سه‌طرفه (GLM) و برای مقایسه‌ی میانگین ویژگی‌های

فیزیکی و شیمیایی خاک از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد در نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۳ استفاده شد. همچنین

برای تحلیل الگوهای تغییرات ویژگی‌های خاک و تعیین روابط میان تیمارها، از آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) با استفاده از نرم‌افزار

PC-ORD نسخه ۵ استفاده گردید.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی خاک:

نتایج آنالیز واریانس ویژگی‌های فیزیکی خاک نشان داد که هیچ‌یک از ویژگی‌ها تحت تأثیر اثرات متقابل بین تیمارها قرار

نگرفتند. در میان عوامل اصلی، عمق خاک به عنوان مؤثرترین فاکتور شناخته شد و بر میزان رس، شن، رطوبت خاک و چگالی

ظاهری اثر معنی‌داری داشت. نوع منطقه تنها بر رطوبت خاک و سن توده‌های جنگلی بر رطوبت و چگالی ظاهری اثر معنی‌دار نشان

دادند (جدول ۲).

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در عمق سطحی خاک، میزان شن بیشتر و مقدار رس کمتر از عمق زیرین است. این اختلاف

در توده‌های ۲۰ ساله منطقه نیمه‌خشک از نظر آماری معنی‌دار بود (به ترتیب ۴۳/۶۰ و ۳۷/۲۰ درصد برای شن و ۴۱/۸۰ و ۳۵/۴۰

درصد برای رس در عمق‌های ۱۰-۰ و ۲۰-۱۰ سانتی‌متر). همچنین، چگالی ظاهری در سن ۳۰ سالگی و عمق دوم هر دو منطقه

اختلاف معنی‌داری نشان داد، به گونه‌ای که بیشترین مقدار آن در توده‌های ۳۰ ساله منطقه مدیترانه، با مقدار ۲/۱۰ گرم بر سانتی‌متر

مکعب، مشاهده شد. میزان رطوبت خاک در منطقه مدیترانه‌ای نسبت به منطقه نیمه‌خشک بیشتر بود و بیشترین مقدار آن (۳۸/۷۰

درصد) در توده‌های ۳۰ ساله و لایه سطحی خاک مشاهده شد که از نظر آماری معنی‌دار بود درحالی‌که کمترین مقدار رطوبت

(۱۸/۹۰ درصد) در توده‌های ۲۰ ساله منطقه نیمه‌خشک و عمق دوم به دست آمد (شکل ۲).

تأثیر معنی‌دار عمق خاک بر تمامی ویژگی‌های فیزیکی با الگوی رایج لایه‌بندی عمودی در خاک‌های جنگلی مطابقت دارد. در

این الگو، لایه‌های سطحی معمولاً دارای چگالی ظاهری کمتر و رطوبت بالاتر هستند که این امر ناشی از تجمع مواد آلی، فعالیت

بیشتر ریشه‌ها و افزایش تخلخل در افق‌های سطحی است (۱۸). روند افزایش چگالی ظاهری با افزایش عمق، بیانگر فشردگی بیشتر

و کاهش تخلخل در افق‌های زیرسطحی است که می‌تواند موجب محدودیت در نفوذ و ذخیره آب و در نتیجه کاهش توسعه ریشه‌ها

شود (۱۹). تأثیر معنی‌دار سن توده‌های جنگلی و تفاوت‌های اقلیمی بر میزان رطوبت خاک را می‌توان به افزایش سطح تاج‌پوشش،

گسترش زی‌توده ریشه‌ای و ورود مواد آلی در طول زمان نسبت داد. این فرآیندها موجب بهبود ساختار خاک، افزایش ظرفیت

نگهداشت آب و ارتقای کارکردهای هیدرولوژیکی، به‌ویژه در شرایط اقلیم مدیترانه‌ای می‌شوند نتایجی که با یافته‌های سایر پژوهش‌ها

نیز هم‌خوانی دارند (۱۱، ۲۰، ۲۱). به‌طورکلی، این یافته‌ها بر نقش مؤثر جنگل‌کاری در بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک در هر دو

اقلیم مورد مطالعه تأکید دارند به‌گونه‌ای که توده‌های مسن‌تر با ارتقای ساختار و عملکرد خاک، به پایداری بیشتر اکوسیستم‌های

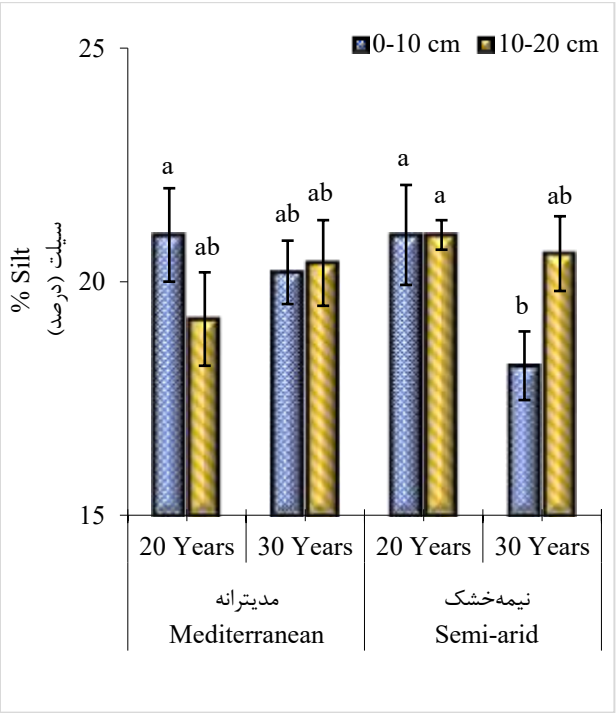
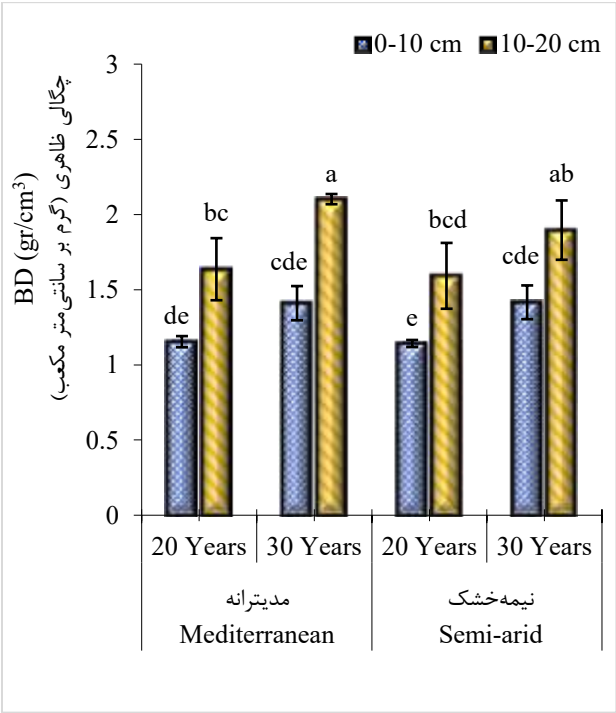
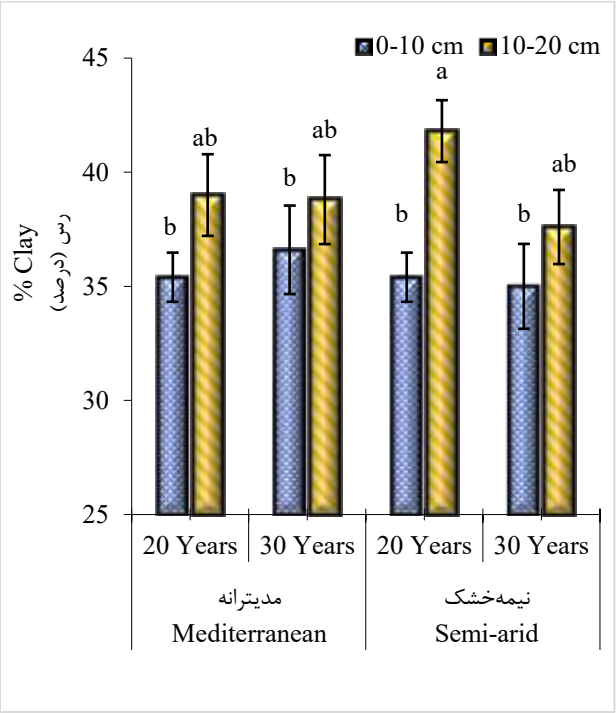
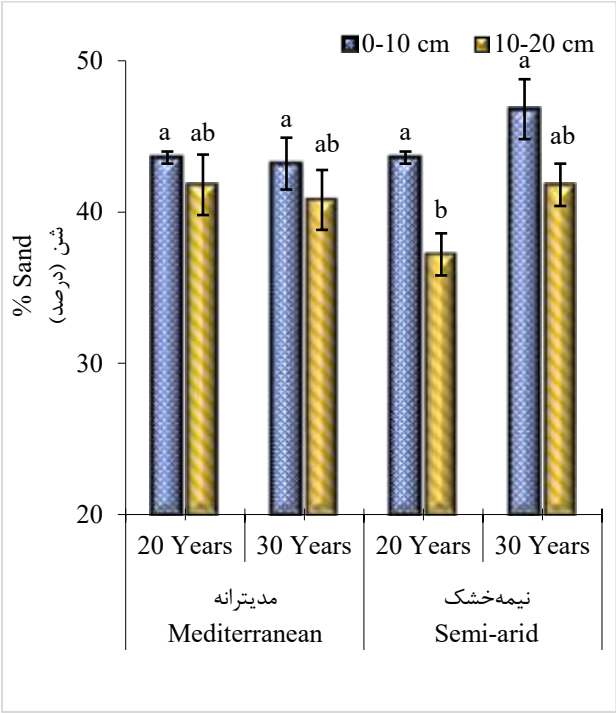
خاکی و کارایی بالاتر چرخه‌های آب و مواد کمک می‌کنند.

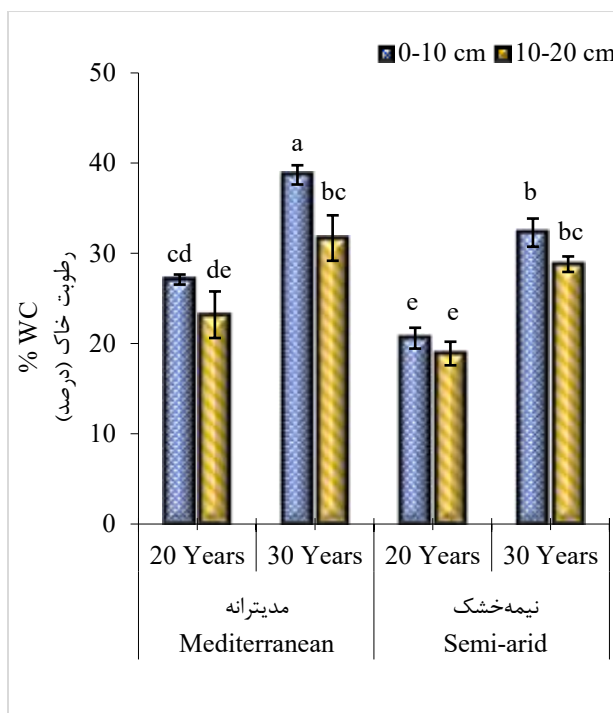
جدول ۲- تجزیه واریانس سه‌طرفه ویژگی‌های فیزیکی خاک (اعداد پر رنگ نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد است)

Table 2- Result of the three- way General Linear Model (GLM) of soil physical properties (Bold numbers indicate a significant difference at the 5% level)

رس Clay				شن Sand			
منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات Mean squares	F	سطح معنی‌داری P-value	میانگین مربعات Mean squares	F	سطح معنی‌داری P-value
منطقه	1	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	1.000
Region							
سن	1	36.100	2.560	0.119	19.600	1.078	0.307
Age							
عمق خاک	1	160.000	11.348	0.002	152.100	8.369	0.007
Soil Depth							
منطقه × سن	1	19.600	1.390	0.247	16.900	0.930	0.342
Region × Age							
منطقه × عمق خاک	1	0.100	0.007	0.933	10.000	0.550	0.464
Region × Soil Depth							
سن × عمق خاک	1	10.000	0.709	0.406	14.400	0.792	0.380
Age × Soil Depth							
منطقه × سن × عمق خاک	1	16.900	1.199	0.282	0.900	0.050	0.825
Region × Age × Soil Depth							
خطا	32	14.100			18.175		
Error							
سیلت Silt				چگالی ظاهری Bulk density (BD)			
منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات Mean squares	F	سطح معنی‌داری P-value	میانگین مربعات Mean squares	F	سطح معنی‌داری P-value
منطقه	1	0.000	0.000	1.000	0.041	0.414	0.524
Region							
سن	1	12.100	3.016	0.092	1.056	10.686	0.003
Age							
عمق خاک	1	0.900	0.224	0.639	2.767	27.990	0.000
Soil Depth							
منطقه × سن	1	8.100	2.019	0.165	0.013	0.131	0.720
Region × Age							
منطقه × عمق خاک	1	8.100	2.019	0.165	0.37	0.376	0.544
Region × Soil Depth							

0.550	0.364	0.036	0.067	3.589	14.400	1	سن × عمق خاک
							Age × Soil Depth
0.654	0.205	0.020	1.000	0.000	0.000	1	منطقه × سن × عمق خاک
							Region × Age × Soil Depth
		0.099			4.013	32	خطا
							Error
رطوبت خاک							
WC							
		سطح معنی داری	F	میانگین مربعات	درجه		
		P-value		Mean squares	آزادی		
					df		
		0.000	19.536	252.506	1		منطقه
							Region
		0.000	84.086	1086.806	1		سن
							Age
		0.001	12.534	162.006	1		عمق خاک
							Soil Depth
		0.744	0.109	1.406	1		منطقه × سن
							Region × Age
		0.219	1.571	20.306	1		منطقه × عمق خاک
							Region × Soil Depth
		0.289	1.161	15.006	1		سن × عمق خاک
							Age × Soil Depth
		0.777	0.082	1.056	1		منطقه × سن × عمق خاک
							Region × Age × Soil Depth
				12.925	32		خطا
							Error





شکل ۲- مقایسه میانگین $\pm$ خطای معیار ویژگی‌های فیزیکی خاک

Figure 2. Compare mean $\pm$ standard error of soil physical properties

ویژگی‌های شیمیایی و کیفیت خاک:

نتایج آنالیز واریانس نشان داد که اثر تیمارهای اصلی و اثرات متقابل آن‌ها بر ویژگی‌های شیمیایی خاک بیشتر از ویژگی‌های فیزیکی بود. در این میان، منطقه جغرافیایی بر میزان نیتروژن کل، فسفر، پتاسیم و شاخص کیفیت خاک اثر معنی‌دار داشت. سن توده جنگلی بر تمام ویژگی‌های شیمیایی (به‌جز pH و فسفر) و عمق خاک بر تمام ویژگی‌ها (به‌جز آهک) تأثیر معنی‌داری نشان داد. از میان اثرات متقابل، اثر سن $\times$ عمق خاک بیشترین تأثیر را داشت و بر میزان کربن آلی، نیتروژن کل، پتاسیم و شاخص کیفیت خاک معنی‌دار بود (جدول ۳).

مقدار pH خاک در عمق دوم تمامی تیمارها بالاتر از عمق سطحی بود و این اختلاف معنی‌دار بود. مقدار هدایت الکتریکی در توده‌های ۲۰ ساله و لایه سطحی خاک (با میانگین ۱۸۱ میکروزیمنس بر سانتی‌متر) بیشتر از توده‌های ۳۰ ساله و عمق دوم خاک بود، درحالی‌که کمترین مقدار آن (۱۱۷ میکروزیمنس بر سانتی‌متر) در عمق دوم درختان ۳۰ ساله منطقه مدیترانه به دست آمد. مقادیر کربن آلی، نیتروژن کل و پتاسیم قابل‌جذب با الگوی مشابه، در توده‌های ۳۰ ساله و لایه سطحی خاک هر دو منطقه بیشترین مقدار را داشتند. حداکثر مقدار کربن آلی، نیتروژن و پتاسیم به ترتیب ۴/۱۳ درصد، ۰/۷۸ درصد و ۸۱۵ میلی‌گرم به کیلوگرم در درختان ۳۰ ساله منطقه مدیترانه مشاهده شد. در مورد فسفر قابل‌جذب خاک، بیشترین مقادیر در توده‌های ۳۰ ساله و در عمق دوم مشاهده شد که این تفاوت از نظر آماری معنی‌دار بود. حداکثر مقدار فسفر (۳۵/۸۰ میلی‌گرم به کیلوگرم) در عمق دوم توده‌های ۳۰ ساله منطقه مدیترانه به دست آمد. مقدار آهک تنها تحت تأثیر سن توده قرار گرفت، به‌طوری‌که در منطقه مدیترانه مقدار آن در توده‌های ۲۰ و ۳۰ ساله به ترتیب ۱۴/۳۸ و ۹/۲۶ درصد بود. شاخص کیفیت خاک در هر دو سن (۲۰ و ۳۰ ساله) و هر دو عمق خاک (۱۰-۰ و ۲۰-۱۰ سانتی‌متر) در منطقه مدیترانه تفاوت معنی‌داری نشان داد. بیشترین مقدار آن برابر با ۰/۸ در عمق سطحی درختان ۳۰ ساله این منطقه بود، درحالی‌که در منطقه نیمه‌خشک، مقدار شاخص در توده‌های ۳۰ ساله بیشتر بود و تفاوت معنی‌داری بین دو عمق خاک ایجاد کرد (شکل ۳).

مقدار pH خاک یکی از عوامل کلیدی تعیین‌کننده کیفیت خاک محسوب می‌شود. پژوهش‌ها نتایج متفاوتی در خصوص تأثیر سن جنگل‌کاری‌ها بر pH گزارش کرده‌اند. برخی افزایش pH را با افزایش سن جنگل بیان کرده‌اند (۲۲)، درحالی‌که برخی دیگر کاهش تدریجی و اسیدی شدن خاک را گزارش کرده‌اند. در مطالعه حاضر، کاهش pH در لایه سطحی می‌تواند ناشی از جذب کاتیون‌ها توسط ریشه‌ها باشد که جهت حفظ بار الکتریکی منجر به آزادسازی H^+ می‌شوند از طرفی، تولید اسیدهای آلی برای تجزیه

مواد آلی انباشت شده می‌تواند در این امر مؤثر باشد (۲۳). در مقابل، افزایش pH با عمق خاک احتمالاً ناشی از انحلال و حرکت کربنات‌ها، بی‌کربنات‌ها و آبشویی کاتیون‌های بازی و تجمع آن‌ها در لایه‌های زیرین (عمق ۲۰-۱۰ سانتی‌متر) است (۲۴) همچنین با افزایش عمق، چگالی خاک افزایش یافته و میزان نفوذپذیری کاهش می‌یابد که این امر تجمع یون‌ها را تسهیل می‌کند (۲۵). چندین مطالعه نشان داده‌اند که در خاک‌هایی با pH کمتر، به‌ویژه زمانی که مقدار مواد آلی بالا باشد، به علت حل شدن مواد معدنی و آزاد شدن یون‌هایی مانند کلسیم، منیزیم و پتاسیم میزان هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد در مقابل خاک‌های قلیایی‌تر، در صورت نبود شوری، معمولاً هدایت الکتریکی پایین‌تری دارند (۲۶، ۲۷).

نتایج این پژوهش نشان داد که مقادیر کربن آلی، نیتروژن کل و پتاسیم قابل جذب با افزایش سن جنگل کاری به‌ویژه در منطقه مدیریتانه افزایش می‌یابد. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های مشابه در جنگل کاری‌های کاج هم‌خوانی دارد که رابطه‌ای مثبت میان سن جنگل و تجمع کربن آلی خاک گزارش کرده‌اند و بیان می‌کنند که کربن و نیتروژن خاک عمدتاً از طریق لاشریزه به خاک، تأمین می‌شوند که این عناصر ابتدا در لایه سطحی خاک انباشته شده و سپس از طریق آبشویی (۱۰، ۲۸)، فعالیت‌های زیستی (مانند سیستم‌های ریشه‌ای عمیق درختان و میکروارگانیسم‌های خاک)، بافت خاک و ترکیبات آلی محلول به عمق خاک منتقل می‌شوند و تحت تأثیر شرایط اقلیمی قرار گرفته که نرخ تجمع مواد آلی در لایه‌های عمیق‌تر را افزایش می‌دهند (۲۹). در توده‌های جنگل کاری جوان، تاج‌پوشش درختان در حال شکل‌گیری است و به دلیل رشد سریع و تولید خالص پایین، بازگشت عناصر غذایی به خاک و جذب آنها زیاد است و زمان گردش عناصر غذایی خاک، سریع است اما در توده‌های بالغ‌تر، با کاهش نرخ رشد درختان و افزایش ورودی مواد آلی، فرصت بیشتری برای انباشت عناصر غذایی فراهم می‌شود (۳۰، ۳۱) در این شرایط ممکن است افزایش پتاسیم از تجزیه لاشبرگ‌ها حاصل شود (۳۲)، درحالی‌که در لایه‌های زیرین با درصد رس بالاتر، ممکن است امکان آزادسازی پتاسیم از بین ورقه‌های رس کاهش یافته و کمبود نسبی آن رخ می‌دهد (۳۳).

افزایش فسفر نیز با رشد سن جنگل کاری و فعالیت‌های میکروبی خاک مرتبط است. در خاک‌های غنی از مواد آلی، قسمت عمده‌ی فسفر قابل جذب به‌صورت فسفر آلی وجود دارد و تجزیه لاشبرگ و معدنی‌شدن مواد آلی موجب بازگشت فسفر به خاک می‌شود بنابراین در مناطق مدیریتانه‌ای، شرایط مناسب رشد گیاه و بارندگی بیشتر موجب هوازدگی سنگ‌ها و آزادسازی فسفر از منابع معدنی می‌گردد (۳۴، ۳۵)؛ که مجموع این عوامل، منجر به افزایش فسفر در این مناطق شده است. کاهش مقدار آهک در توده‌های مسن‌تر ممکن است به دلیل فعالیت میکروارگانیسم‌ها و تولید دی‌اکسیدکربن و اسیدکربنیک باشد که حلالیت آهک را افزایش می‌دهد علاوه‌براین توده‌های مسن‌تر با داشتن تاج‌پوشش بیشتر، بهترین توضیح‌دهنده تغییرات رطوبت خاک در مقیاس‌های زمانی و مکانی هستند (۳۶) که می‌توانند تبخیر آب را کاهش داده و با تغییر در پتانسیل هیدرولیک خاک، منجر به بهبود زه‌کشی و کاهش انتقال آهک به سطح خاک شود (۳۷). Kara and Bolat (۲۰۰۸) بیان می‌کنند که فرسایش لایه‌های سطحی می‌تواند افق‌های آهکی زیرین را آشکار کرده و موجب افزایش مقدار آهک شود (۳۸). ازاین‌رو، بیشتر بودن آهک در افق سطحی توده‌های ۲۰ ساله منطقه مدیریتانه که بارندگی بیشتری دارند، توجیه‌پذیر است.

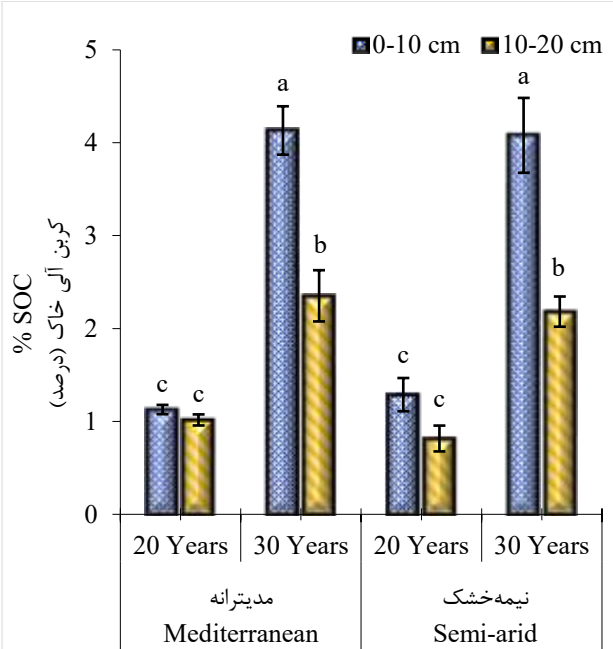
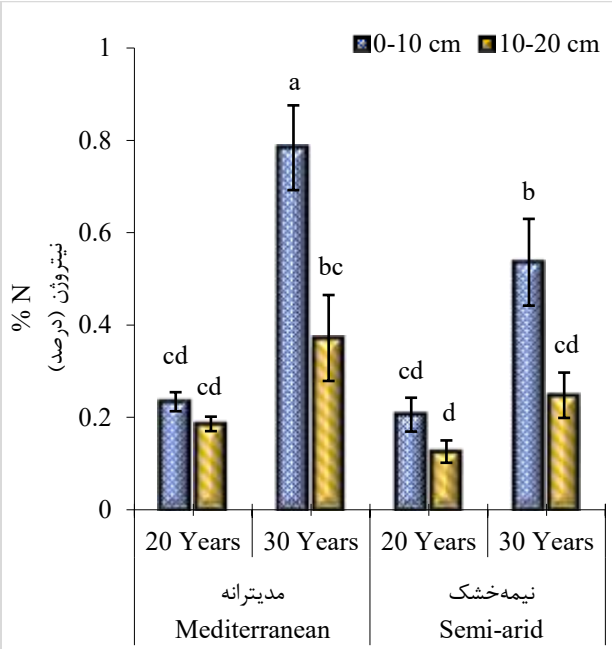
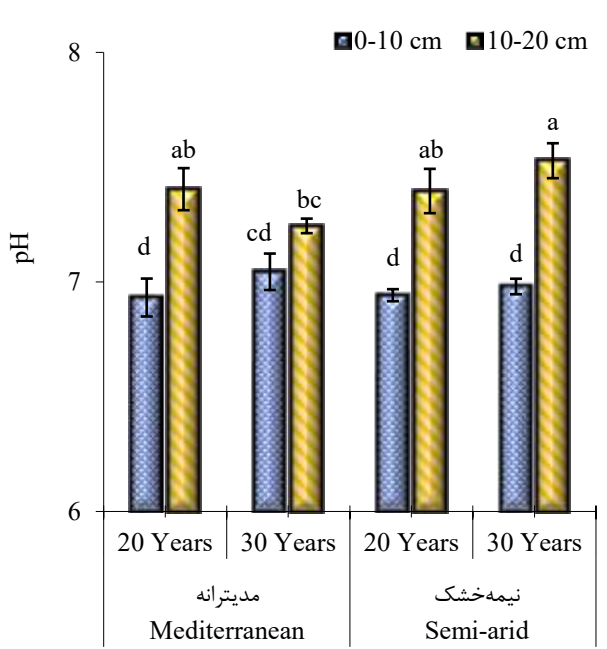
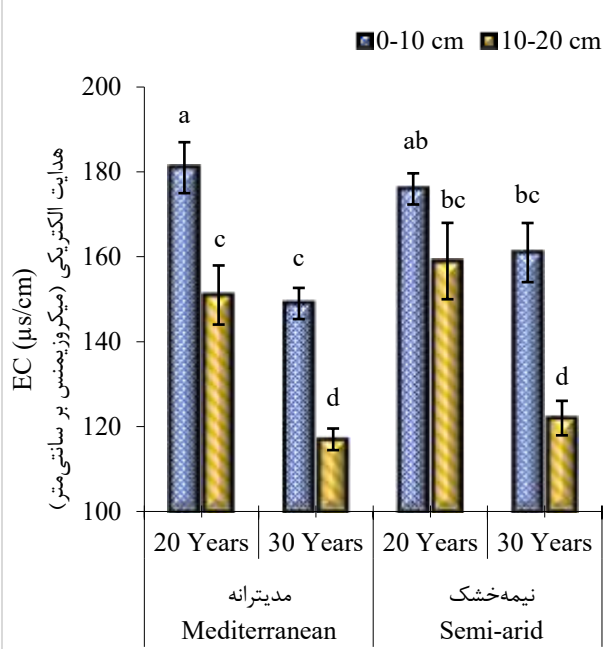
افزایش شاخص کیفیت خاک در توده‌های ۳۰ ساله منطقه مدیریتانه و لایه سطحی، ناشی از عوامل متعددی از جمله افزایش ورودی‌های ماده آلی از طریق لاشریزه‌ها و بقایای گیاهی، بهبود ساختار فیزیکی خاک، افزایش فعالیت‌های زیستی و کاهش فرسایش سطحی است که همگی با گذشت زمان و بلوغ درخت کاج تقویت می‌شوند. این نتایج با یافته‌های پژوهش‌های جنگل کاری کاج در مناطق مدیریتانه‌ای هم‌خوانی دارد که نشان داده‌اند این جنگل کاری‌ها باعث بهبود زه‌کشی، افزایش نفوذ آب، کربن آلی و نیتروژن خاک در افق‌های سطحی می‌شوند (۳۹). بر اساس مطالعات، جنگل کاری‌های جوان‌تر گونه کاج (۲۰ ساله) برای ایجاد تغییرات معنی‌دار در ویژگی‌های خاک به دوره‌های زمانی طولانی‌تری نیاز دارند (۴۰).

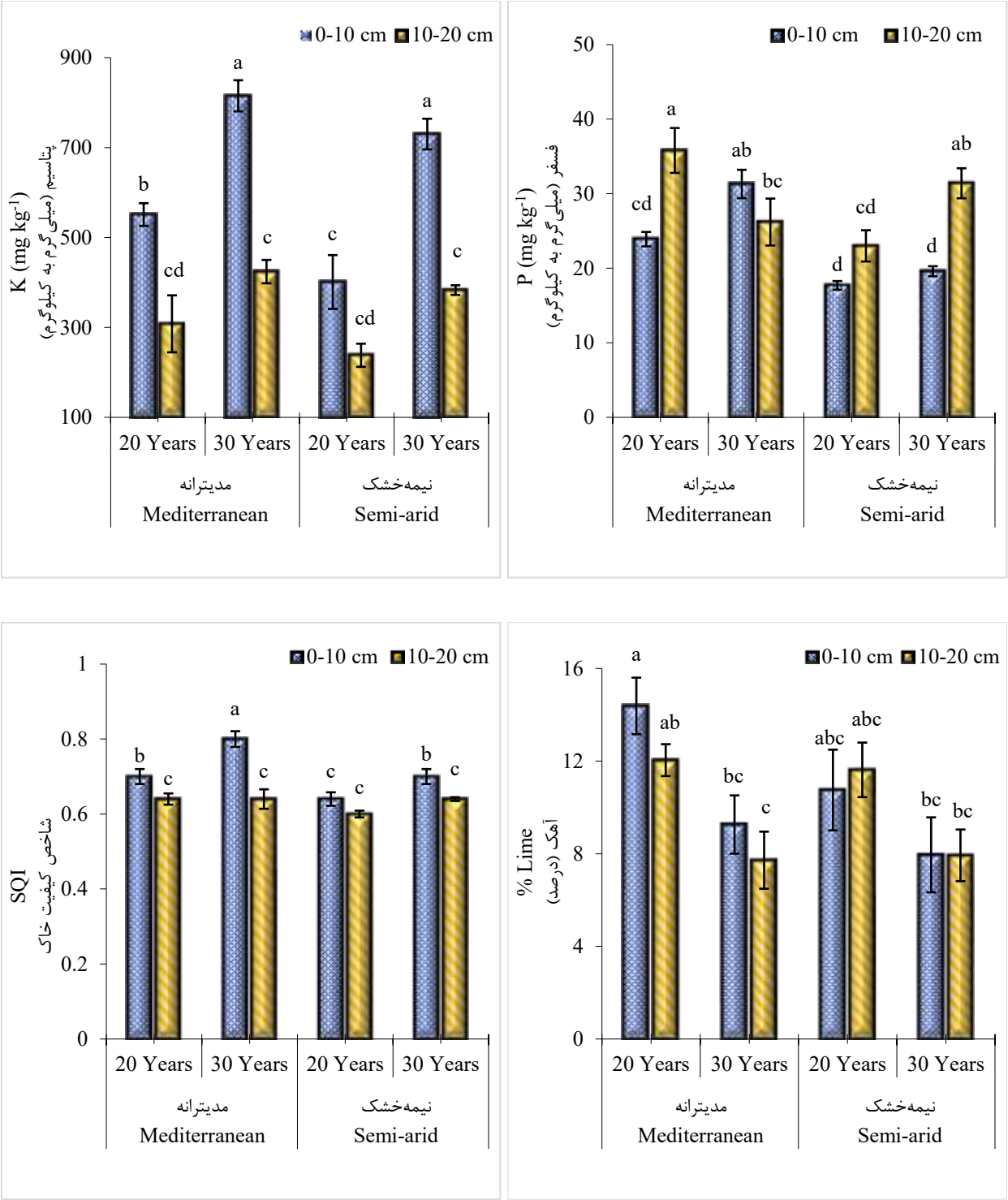
جدول ۳- تجزیه واریانس سه طرفه ویژگی های شیمیایی و کیفیت خاک (اعداد پر رنگ نشان دهنده اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد است)

Table 3- Result of the three- way General Linear Model (GLM) of soil chemical properties and Soil Quality Index (SQI) (Bold numbers indicate a significant difference at the 5% level)

هدایت الکتریکی				pH			
Electrical Conductivity (EC)							
سطح معنی داری	F	میانگین مربعات	سطح معنی داری	F	میانگین مربعات	درجه آزادی	منبع تغییرات
P-value		Mean squares	P-value		Mean squares	df	
0.227	1.515	250.000	0.272	1.248	0.031	1	منطقه
							Region
0.000	52.742	8702.500	0.544	0.377	0.009	1	سن
							Age
0.000	52.742	8702.500	0.000	70.933	1.751	1	عمق خاک
							Soil Depth
0.395	0.742	122.500	0.281	1.203	0.030	1	منطقه × سن
							Region × Age
0.714	0.136	22.500	0.107	2.757	0.068	1	منطقه × عمق خاک
							Region × Soil Depth
0.149	2.182	360.000	0.377	0.802	0.020	1	سن × عمق خاک
							Age × Soil Depth
0.227	1.515	250.000	0.075	3.391	0.084	1	منطقه × سن × عمق خاک
							Region × Age × Soil Depth
		165.000			0.025	32	خطا
							Error
نیتروژن کل				کربن آلی خاک			
Total Nitrogen				Soil Organic Carbon (SOC)			
سطح معنی داری	F	میانگین مربعات	سطح معنی داری	F	میانگین مربعات	درجه آزادی	
P-value		Mean squares	P-value		Mean squares	df	
0.013	6.840	0.132	0.678	0.176	0.043	1	منطقه
							Region
0.000	45.624	0.882	0.000	185.050	45.135	1	سن
							Age
0.000	22.163	0.428	0.000	46.546	11.353	1	عمق خاک
							Soil Depth
0.116	2.607	0.050	0.773	0.085	0.021	1	منطقه × سن
							Region × Age
0.605	0.274	0.005	0.450	0.585	0.143	1	منطقه × عمق خاک
							Region × Soil Depth
0.003	10.577	0.204	0.000	24.530	5.983	1	سن × عمق خاک
							Age × Soil Depth
0.382	0.787	0.015	0.701	0.150	0.37	1	منطقه × سن × عمق خاک
							Region × Age × Soil Depth
		0.019			0.244	32	خطا
							Error
پتاسیم قابل جذب				فسفر قابل جذب			
Available potassium (K)				Available phosphorus (P)			
سطح معنی داری	F	میانگین مربعات	سطح معنی داری	F	میانگین مربعات	درجه آزادی	
P-value		Mean squares	P-value		Mean squares	df	
0.003	9.943	74822.500	0.000	19.831	406.406	1	منطقه
							Region
0.000	60.574	455822.500	0.167	2.001	41.006	1	سن
							Age
0.000	108.699	817960.000	0.000	17.420	357.006	1	عمق خاک
							Soil Depth
0.398	0.734	5522.500	0.036	4.765	97.656	1	منطقه × سن
							Region × Age
0.267	1.277	9610.000	0.081	3.235	66.306	1	منطقه × عمق خاک
							Region × Soil Depth
0.005	9.155	68890.000	0.076	3.362	68.906	1	سن × عمق خاک
							Age × Soil Depth
0.745	0.108	810.000	0.000	16.842	345.156	1	منطقه × سن × عمق خاک
							Region × Age × Soil Depth

7525.000				20.494		32	خطا
							Error
شاخص کیفیت خاک				آهک			
Soil Quality Index (SQI)				Lime			
سطح معنی داری	F	میانگین مربعات	سطح معنی داری	F	میانگین مربعات	درجه آزادی	
P-value		Mean squares	P-value		Mean squares	df	
0.001	12.322	0.019	0.168	1.987	16.577	1	منطقه
							Region
0.000	22.856	0.035	0.000	19.016	158.603	1	سن
							Age
0.000	51.740	0.078	0.413	0.688	5.738	1	عمق خاک
							Soil Depth
0.653	0.206	0.000	0.425	0.652	5.439	1	منطقه × سن
							Region × Age
0.082	3.226	0.005	0.205	1.676	13.983	1	منطقه × عمق خاک
							Region × Soil Depth
0.003	10.602	0.016	0.980	0.001	0.005	1	سن × عمق خاک
							Age × Soil Depth
0.324	1.005	0.002	0.647	0.214	1.785	1	منطقه × سن × عمق خاک
							Region × Age × Soil Depth
		0.002			8.341	32	خطا
							Error





شکل ۳ - مقایسه میانگین $\pm$ خطای معیار ویژگی‌های شیمیایی و کیفیت خاک

Figure 3. Compare mean $\pm$ standard error of soil chemical properties and Soil Quality Index

آنالیز مؤلفه‌های اصلی

این آنالیز روابط چندمتغیره میان ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و شاخص کیفیت خاک را در تیمارهای مختلف خلاصه و تبیین می‌کند (جدول ۴). بر اساس نتایج، دو محور نخست به ترتیب ۳۶/۸۲ و ۲۳/۳۰ درصد از واریانس کل را توضیح می‌دهند، به‌طوری‌که درمجموع ۶۰/۱۲ درصد از تغییرات داده‌ها را شامل می‌شوند. این مقدار نشان‌دهنده‌ی دقت و توان بالای مدل در نمایش الگوی کلی تغییرات ویژگی‌های خاک است و با یافته‌های سایر پژوهش‌ها که نشان می‌دهند، آنالیز مؤلفه‌های اصلی ابزاری مناسب برای شناسایی و اندازه‌گیری نقش نسبی تیمارها بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک است، مطابقت دارد (۴۱).

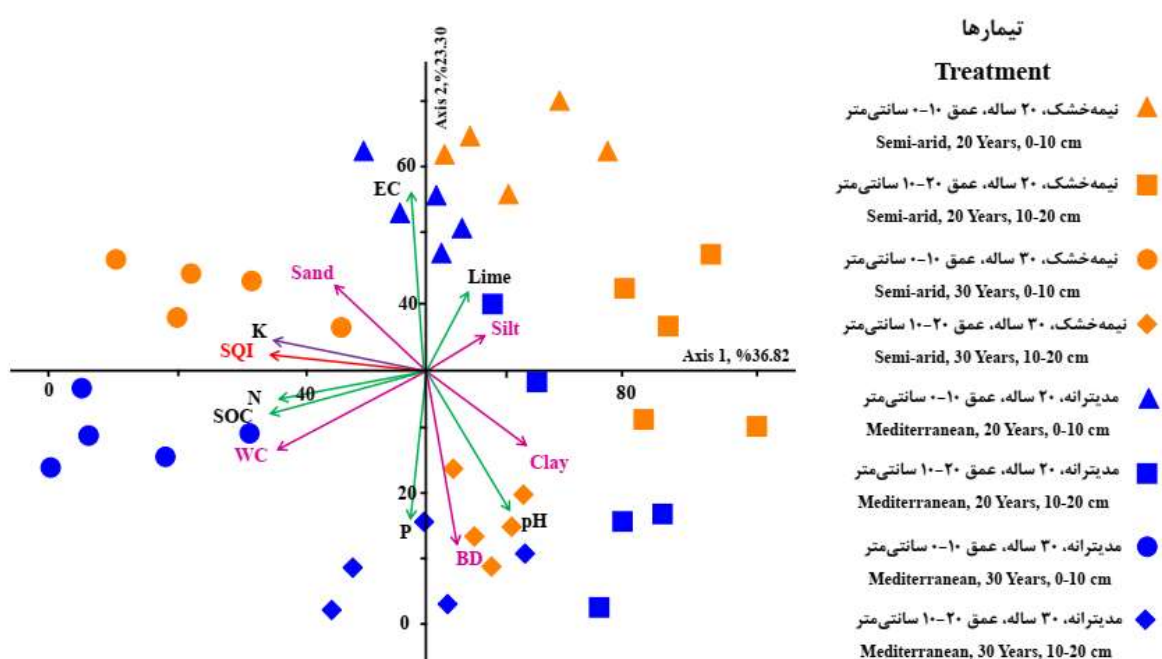
الگوی پراکنش نمونه‌ها در نمودار نشان می‌دهد که مناطق نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای تفکیک‌پذیری مشخصی از یکدیگر ندارند و نمونه‌های مربوط به هر دو منطقه در سراسر نمودار پراکنده‌اند. باین‌حال، نمونه‌های مربوط به سن ۳۰ ساله و عمق اول خاک، به‌طور مشخص در بخش بالایی سمت چپ نمودار قرار گرفته‌اند. این گروه با بیشترین مقادیر رطوبت خاک و غلظت بالاتر عناصر شیمیایی شامل کربن آلی، نیتروژن و پتاسیم مشخص می‌شوند. شاخص کیفیت خاک نیز در این گروه در بیشترین مقدار خود قرار دارد. نمونه‌های مربوط به سن ۳۰ ساله و عمق دوم خاک با مقادیر بالاتر فسفر قابل‌جذب، pH، رس و چگالی ظاهری نسبت به سایر تیمارها متمایز می‌شوند. در مقابل، نمونه‌های مربوط به سن ۲۰ ساله در هر دو عمق و هر دو اقلیم، به ترتیب در بخش‌های بالایی و

پایینی سمت راست نمودار تجمع یافته‌اند. این گروه با مقادیر بالاتر سیلت، رس، آهک و هدایت الکتریکی مشخص می‌شوند که بیانگر ماهیت قلیایی‌تر و شوری بیشتر خاک در این تیمارهاست (شکل ۴).

شاخص کیفیت خاک به‌عنوان ابزاری کارآمد و مؤثر برای ارزیابی و پایش وضعیت خاک در اکوسیستم‌های جنگلی به کار می‌رود. بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در لایه‌های سطحی خاک که فعال‌ترین بخش از نظر زیستی محسوب می‌شوند به‌ویژه در منطقه مدیترانه، منجر به افزایش شاخص کیفیت خاک در جنگل‌کاری‌های ۳۰ ساله شده است. این امر احتمالاً ناشی از کاهش فرسایش و بهبود پایداری ساختار خاک است.

جدول ۴- همبستگی پیرسون ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و کیفیت خاک. ** معنی‌دار بودن در سطح ۰/۰۱ و * معنی‌دار بودن در سطح ۰/۰۵ را نشان می‌دهد ns به معنای عدم تفاوت معنی‌دار است.

Table 4- Pearson correlation of soil physical, chemiactal and Quality Index. ** indicates significance at 0.01 level and * indicates significance at 0.05 level, ns means no significant difference.		
متغیرها	محور ۱	محور ۲
Variabels	Axis 1	Axis 2
رس	0.581 **	-0.340 *
Clay		
شن	-0.530 **	0.394 *
Sand		
سیلت	0.338 *	0.163 ns
Silt		
چگالی ظاهری	0.174 ns	-0.789 **
Bulk density (BD)		
رطوبت خاک	-0.859 **	-0.358 *
WC		
pH	0.483 *	-0.634 **
هدایت الکتریکی	-0.005 ns	0.848 **
Electrical Conductivity (EC)		
کربن آلی خاک	-0.902 **	-0.194 ns
Soil Organic Carbon (SOC)		
نیتروژن کل	-0.898 **	-0.159 ns
Total Nitrogen		
فسفر قابل جذب	-0.092 ns	-0.672 **
Available phosphorus (P)		
پتاسیم قابل جذب	-0.882 **	0.140 ns
Available potassium (K)		
آهک	0.246 ns	0.361 *
Lime		
شاخص کیفیت خاک	-0.902 **	0.108 ns
Soil Quality Index (SQI)		



شکل ۴- آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و کیفیت خاک. BD: چگالی ظاهری، WC: رطوبت خاک، EC: هدایت الکتریکی، SOC: کربن آلی، N: نیتروژن کل، P: فسفر قابل جذب، K: پتاسیم قابل جذب، Lime: آهک، SQI: شاخص کیفیت خاک.

Figure 4: Principal component analysis (PCA) of soil physical, chemical and Quality Index. BD: Bulk Density, WC: Water Content, EC: Electrical Conductivity, SOC: Soil Organic Carbon, N: Total nitrogen, P: Phosphorus, K: Potassium, Lime: Calcium Carbonate, SQI: Soil Quality Index.

نتیجه‌گیری کلی

به‌طورکلی، نتایج این پژوهش هم‌راستا با سایر یافته‌های علمی درباره جنگل‌کاری با گونه‌های کاج در اراضی تخریب‌یافته (۱۳)، نشان داد که جنگل‌کاری با گونه‌ی کاج تهران (*Pinus eldarica* Medw) در اراضی تخریب‌شده می‌تواند به بهبود چندجانبه‌ی کیفیت خاک در مناطق نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای منجر شود. سن جنگل‌کاری، به‌ویژه در بازه‌ی زمانی یک دهه (توده‌های ۳۰ ساله در مقایسه با ۲۰ ساله)، به‌عنوان عامل کلیدی در بهبود ویژگی‌های رطوبتی و شیمیایی خاک از جمله کربن آلی، نیتروژن، فسفر و پتاسیم به‌ویژه در لایه‌های سطحی خاک شناسایی شد. این تغییرات در نهایت منجر به افزایش معنی‌دار شاخص کیفیت خاک گردیدند. الگوهای به‌دست‌آمده از آنالیز مؤلفه‌های اصلی نیز این نتایج را تأیید کرده و نشان دادند که اثرات تجمعی مواد آلی، گسترش سیستم ریشه‌ای و ورودی‌های ناشی از لاشبرگ‌ها نقش مهمی در کاهش تخریب خاک و بهبود پایداری آن دارند. هرچند تفاوت‌های اقلیمی میان دو منطقه کمتر محسوس بود، اما شرایط مدیترانه‌ای با فراهم کردن بستر مناسب‌تر برای چرخه عناصر غذایی، نقش برجسته‌تری در بازسازی و احیای خاک ایفا نمود. درمجموع فرضیه تحقیق، مبنی بر تأثیر مثبت سن جنگل‌کاری و شرایط اقلیمی بر بهبود کیفیت خاک اراضی تخریب‌شده در توده‌های کاج تهران تأیید شد بااین‌حال، این بهبودها به‌منزله‌ی توصیه عمومی برای جنگل‌کاری با این‌گونه نیست اما می‌تواند به‌عنوان یک گزینه موقتی در مراحل ابتدایی بازسازی اکوسیستم مدنظر قرار بگیرد. با توجه به اینکه برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در جنگل‌کاری‌های کاج ممکن است در بازه‌های زمانی طولانی‌تر دستخوش تغییر شوند، پیشنهاد می‌شود روند تکامل و حاصلخیزی خاک در دوره‌های بلندمدت‌تر، نظیر ۴۰، ۶۰ و ۸۰ سال پس از کاشت و مقایسه آن با گونه‌های بومی نیز مورد بررسی قرار گیرد.

منابع

- Attarod, P., Sadeghi, S.M.M., Pypker, T. G., Bagheri, H., Bagheri, M., & Bayramzadeh, V. (2015). Needle-leaved trees impacts on rainfall interception and canopy storage capacity in an arid environment. *New Forests*. 46: 3. 339-355.
- Davies, K. W., & Johnson, D. D. (2024). Dryland restoration needs suggest a role for introduced plants. *Global Ecology and Conservation*, 53, e03005.
- Jazirei, M.H. 2009. Dryland afforestation, 560p. Tehran, Iran: University of Tehran Press. [In Persian]
- Farzaliyev, V., & Afonin, A. (2016). Prognostication of plantation possibilities of *Pinus eldarica* Medw. by use of geoinformational technologies. *Applied Ecology and Environmental Research*. 14: 4. 121-131.
- Khalife, S.F., Kiani, B., Hakimi, M.M., & Tabande, S.A. (2016). Comparing growth and success of Eldarican pine (*Pinus eldarica* Medw.) in pure and mixed stands with river red gum (*Eucalyptus*

- camadulensis* Dehnh.) in Shahid-Paidar Park, Ardakan. Iranian Journal of Forest and Poplar Research. 24: 3. 549-558. [In Persian]
6. Hosseini, S.S., & Hosseini, V. (2014). Effect of Reforestation with *Pinus nigra* Arnold, *Pinus eldarica* Medw. and *Cupressus arizonica* Greene Spices on some Properties of Soil (Case Study: Garan region, Marivan). *Ecology of Iranian Forest*. 2: 4. 37-44. [In Persian]
 7. Mehrnoosh, S., Beheshti Ale Agha, A., Pourreza, M., Safari Sinegani, A.A., & Rakhsh, F. (2023). Comparison of physical and chemical characteristics of soil in forestry with coniferous and deciduous trees in Bistun region of Kermanshah. *Journal of Soil Productivity*. 1: 1 [In Persian].
 8. Karamian, M., Mirzaei, J., Heydari, M., Kooch, Y., & Labelle, E.R. (2023). Seasonal effects of native and non-native woody species on soil chemical and biological properties in semi-arid forests, western Iran. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 23: 3. 4474-4490.
 9. Lucas-Borja, M. E., Hedro, J., Cerdá, A., Candel-Pérez, D., & Viñegla, B. (2016). Unravelling the importance of forest age stand and forest structure driving microbiological soil properties, enzymatic activities and soil nutrients content in Mediterranean Spanish black pine (*Pinus nigra* Ar. ssp. *salzmannii*) Forest. *Science of the Total Environment*. 562: 145-154.
 10. Yin, X., Zhao, L., Fang, Q., & Ding, G. (2021). Differences in soil physicochemical properties in different-aged *Pinus massoniana* plantations in Southwest China. *Forests*. 12: 8. 987.
 11. Luo, L., Lin, K., Tao, L., Luo, C., Wang, J., Duan, T., o& Liu, Y. (2025). Effects of stand structure and soil depth on soil properties in *Cryptomeria japonica* plantations. *Frontiers in Forests and Global Change*. 8: 1548485.
 12. Marín, F., Dahik, C.Q., Mosquera, G.M., Feyen, J., Cisneros, P., & Crespo, P. (2019). Changes in soil hydro-physical properties and SOM due to pine afforestation and grazing in Andean environments cannot be generalized. *Forests*. 10: 1. 17.
 13. Tudor, C., Constandache, C., Dinca, L., Murariu, G., Badea, N.O., Tudose, N.C., & Marin, M. (2025). Pine Afforestation on degraded lands: A global review of carbon sequestration potential. *Frontiers in Forests and Global Change*. 8: 1648094.
 14. Krimi, H., and Alimoradi, S. (2018). Geological survey of Ilam province and its importance in archeology. *Archaeological Studies*. 2: 6. 1-20. [In Persian]
 15. Ilam province meteorological department. (2024). Annual statistical yearbook. [In Persian]
 16. Jafari Haghighi, M. (2003). Methods of soil analysis, sampling, and important physical and chemical analysis (with emphasis on theoretical & applied principles). Nedaye Zoho Publication. 240p. [In Persian]
 17. Taghipour, K., Heydari, M., Kooch, Y., Fathizad, H., Heung, B., & Taghizadeh-Mehrjardi, R. (2022). Assessing changes in soil quality between protected and degraded forests using digital soil mapping for semiarid oak forests, Iran. *CATENA*. 213: 106204.
 18. Hofmeister, K.L., Feitl, G., Tackett, K., Fleury, L., & Nave, L.E. (2025). Land-use effects on soil organic matter and related soil properties in a mixed agricultural–forest landscape of central Wisconsin, USA. *Soil Science Society of America Journal*. 89: 1. e70009.
 19. Wang, D., Niu, J., Yang, T., Miao, Y., Zhang, L., Chen, X., & Berndtsson, R. (2024). Soil water infiltration characteristics of reforested areas in the paleo-periglacial eastern Liaoning mountainous regions, China. *Catena*. 234: 107613.
 20. Zuo, K., Fan, L., Guo, Z., Zhang, J., Duan, Y., Zhang, L., & Hu, R. (2023). Aboveground biomass component plasticity and allocation variations of bamboo (*Pleioblastus amarus*) of different regions. *Forests*. 15: 1. 43.
 21. Gong, C., Tan, Q., Liu, G., & Xu, M. (2024). Positive effects of mixed-species plantations on soil water storage across the Chinese Loess Plateau. *Forest Ecology and Management*. 552: 121571.
 22. Malchair, S., & Carnol, M. (2009). Microbial biomass and C and N transformations in forest floors under European beech, sessile oak, Norway spruce and Douglas-fir at four temperate forest sites. *Soil Biology and Biochemistry*. 41: 4. 831-839.
 23. Havlin, J.L., Tisdale, S.L., Nelson, W.L., Beaton, J.D. (2017). Soil fertility and fertilizers an introduction to nutreient management. Eighth Edition. 519p.
 24. Wong, V.N., Dalal, R.C., & Greene, R.S. (2008). Salinity and sodicity effects on respiration and microbial biomass of soil. *Biology and Fertility of Soils*. 44: 7. 943-953.
 25. Özdemir, N., Demir, Z., & Bülbül, E. (2022). Relationships between some soil properties and bulk density under different land use. *Soil Studies*. 11: 2. 43-50.
 26. Brady, N.C., & Weil, R.R. (2016). The nature and properties of soils (15th ed.). Pearson.
 27. Jaiswal, S., & Shrivastava, A.K. (2022). Influence of soil pH and salinity on electrical and dielectric properties. *IJFANS International Journal of Food and Nutritional Sciences*. 11: 13. 2968-2979.
 28. Pan, P., Zhao, F., Ning, J., Zhang, L., Ouyang, X., & Zang, H. (2018). Impact of understory vegetation on soil carbon and nitrogen dynamic in aerially seeded *Pinus massoniana* plantations. *PLoS One*. 13: 1. e0191952.
 29. Rolando, J.L., Dubeux, J.C., Souza, T.C.D., Mackowiak, C., Wright, D., George, S., Tatiana, P., & Santos, E. (2021). Organic carbon is mostly stored in deep soil and only affected by land use in its superficial layers: A case study. *Agrosystems, Geosciences & Environment*. 4: 1. e20135.
 30. Zhang, Z., Huang, X., & Zhou, Y. (2020). Spatial heterogeneity of soil organic carbon in a karst region under different land use patterns. *Ecosphere*. 11: 3. e03077.
 31. Montfort, F., Nourtier, M., Grinand, C., Maneau, S., Mercier, C., Roelens, J.B., & Blanc, L. (2021). Regeneration capacities of woody species biodiversity and soil properties in Miombo woodland after slash-and-burn agriculture in Mozambique. *Forest Ecology and Management*. 488: 119039.
 32. Mishra, A., Sharma, S.D., & Khan, G.H. (2003). Improvement in physical and chemical properties of sodic soil by 3, 6 and 9 years old plantation of *Eucalyptus tereticornis*: Biorejuvenation of sodic soil. *Forest Ecology and Management*. 184: 1-3. 115-124.
 33. Habibi Kaseb, H. (1992). Principles of forest soil. Tehran University Publications, No. 2118, 425p. [In Persian].
 34. Elbasiouny, H., Elbehiry, F., El-Ramady, H., & Brevik, E.C. (2020). Phosphorus availability and potential environmental risk assessment in alkaline soils. *Agriculture*. 10: 5. 172.

35. Gong, C., Han, J., Dai, J., Xia, R., Wan, Z., Zhang, S., & Xu, J. (2024). Vertical distribution patterns of nitrogen and phosphorus in soil solution: insights from a wetland trial site in the Li River Basin. *Water*. 16: 13. 1830.
36. Meijers, E., Groenewoud, R., de Vries, J., van der Zee, J., Nabuurs, G.J., Vos, M., & Sterck, F. (2025). Canopy cover at the crown-scale best predicts spatial heterogeneity of soil moisture within a temperate Atlantic forest. *Agricultural and Forest Meteorology*. 363:110431.
37. Broderson, W.D. (2010). From the surface down an introduction to soil surveys for agronomic use. United States department of agriculture, natural resources conservation service. Soil survey staff.
38. Kara, O., & Bolat, I. (2008). The effect of different land uses on soil microbial biomass carbon and nitrogen in Bartın province. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 32: 4. 281-288.
39. Martín-Peinado, F.J., Navarro, F.B., Jiménez, M.N., Sierra, M., Martínez, F.J., Romero-Freire, A., & Fernández-Ondoño, E. (2016). Long-term effects of pine plantations on soil quality in southern Spain. *Land Degradation & Development*. 27: 7. 1709-1720.
40. Mongil-Manso, J., Navarro-Hevia, J., & San Martín, R. (2022). Impact of land use change and afforestation on soil properties in a Mediterranean Mountain area of Central Spain. *Land*. 11: 7. 1043.
41. Andrés-Abellán, M., Wic-Baena, C., López-Serrano, F.R., García-Morote, F.A., Martínez-García, E., Picazo, M.I., & García-Izquierdo, C. (2019). A soil-quality index for soil from Mediterranean forests. *European Journal of Soil Science*. 70: 5. 1001-1011.

Effects of pine (*Pinus eldarica* Medw) on physical and chemical properties and soil quality in (Case study: Sirvan and Eyvan Counties)

Yasem Khanmohamadian¹, Javad Mirzaei^{2*}, Mehdi Heydari³, Mahnaz Karamian⁴

¹ Ph.D. Student, Department of Forest Science, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

² Associ. Prof., Department of Forest Science, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

³ Prof., Department of Forest Science, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

⁴ Ph.D in Forest biology, Student, Department of Forest Science, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

Received: 01/11/2025 Accepted: 13/12/2025

*Corresponding outhor: j.mirzaei@ilam.ac.ir

Abstract

Background and Objective:

Pinus eldarica Medw. plantations influence physical and chemical soil properties and soil quality indices, although these effects vary with climate, plantation age, and soil depth. This study aimed to investigate the short-term (20-year) and medium-term (30-year) impacts of *P. eldarica* afforestation on soil characteristics.

Materials and Methods:

Based on the Demarton index, representative semi-arid and Mediterranean climate zones in Ilam Province were selected. Within each zone, 20- and 30-year-old *P. eldarica* plantations were studied. Soil samples were collected in a completely randomized design from two depths (0–10 cm and 10–20 cm) with five replicates per treatment. Data were analyzed using three-way analysis of variance (GLM) in a factorial arrangement to assess treatment effects and interactions on physical (soil texture, bulk density, moisture) and chemical (pH, electrical conductivity, organic carbon, total nitrogen, available phosphorus, available potassium, lime) properties and the soil quality index. Mean comparisons were performed using Duncan's test at $P < 0.05$. Principal component analysis (PCA) was used to examine relationships among soil variables and patterns of variation across treatments.

Results:

Soil depth significantly influenced clay, sand, moisture, and bulk density. Climate significantly affected soil moisture, while plantation age significantly affected moisture and bulk density, with moisture in 30-year-old stands being approximately 1.5 times higher than in 20-year-old stands. Climate also significantly affected total nitrogen, available phosphorus, available potassium, and the soil quality index. Stand age and soil depth significantly influenced most chemical properties. The age $\times$ depth interaction significantly affected organic carbon, total nitrogen, available potassium, and the soil quality index. In the surface layer (0–10 cm), 30-year-old stands exhibited 3.0–3.5 times higher organic carbon, 2.5–3.0 times higher total nitrogen, 1.5–1.8 times higher available potassium, and 1.14–1.15 times higher soil quality index, along with lower electrical conductivity compared to 20-year-old stands, with differences evident in both semi-arid and Mediterranean zones.

Conclusion:

Afforestation with the non-native *Pinus eldarica* in degraded lands can contribute to soil conservation, water retention, carbon storage, and landscape rehabilitation. Although soil quality improved more significantly under Mediterranean conditions, due to higher organic inputs, favorable climate, and greater water-holding capacity, older stands in semi-arid regions also showed gradual improvement in key properties. These stands enhanced soil stability under water-limited conditions by increasing carbon and nitrogen content and reducing salinity. Continued afforestation programs using non-native pines should be accompanied by long-term monitoring and rigorous comparison with native species to ensure meaningful contributions to sustainable natural resource management and the restoration of ecological balance in vulnerable ecosystems.

Keywords: Climate, Ilam Province, Plantation, Soil depth, Zagros forests.