

(OPEN ACCESS)

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

Yasem Khanmohamadian<sup>1</sup>, Javad Mirzaei<sup>\*2</sup>, Mehdi Heydari<sup>3</sup>, Mahnaz Karamian<sup>4</sup>

1. Ph.D. Student in Forest Biological Science, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran. E-mail: [yasem\\_khanmohammadi@yahoo.com](mailto:yasem_khanmohammadi@yahoo.com)
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Forest Science, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran. E-mail: [j.mirzaei@ilam.ac.ir](mailto:j.mirzaei@ilam.ac.ir)
3. Professor, Dept. of Forest Science, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran. E-mail: [m.heidari@ilam.ac.ir](mailto:m.heidari@ilam.ac.ir)
4. Ph.D. in Forest Biological Science, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran. E-mail: [m.karamian67@yahoo.com](mailto:m.karamian67@yahoo.com)

---

---

**Article Info**

**Article type:**  
Full Length Research Paper

**Article history:**  
Received: 11.01.2025  
Revised: 12.14.2025  
Accepted: 12.14.2025

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

---

---

**ABSTRACT**

**Background and Objectives:** *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.

---

Cite this article: Khanmohamadian, Yasem, Mirzaei, Javad, Heydari, Mehdi, Karamian, Mahnaz. 2026. Effects of pine (*Pinus eldarica* Medw.) on physical and chemical properties and soil quality in (Case study: Sirvan and Eyvan Counties). *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 32 (4), 1-23.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwfst.2025.24230.2134

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

---

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

یاسم خانمحمدیان<sup>۱</sup>، جواد میرزایی<sup>۲\*</sup>، مهدی حیدری<sup>۳</sup>، مهناز کرمان<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکتری علوم زیستی جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. رایانامه: [yasem\\_khanmohammadi@yahoo.com](mailto:yasem_khanmohammadi@yahoo.com)
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. رایانامه: [j.mirzaei@ilam.ac.ir](mailto:j.mirzaei@ilam.ac.ir)
۳. استاد تمام گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. رایانامه: [m.heidari@ilam.ac.ir](mailto:m.heidari@ilam.ac.ir)
۴. دکتری علوم زیستی جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. رایانامه: [m.karamian67@yahoo.com](mailto:m.karamian67@yahoo.com)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: نهال‌کاری با گونه کاج تهران ( <i>Pinus eldarica</i> Medw.) موجب تغییر در ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و شاخص کیفیت خاک می‌شود. با این حال، میزان این تغییرات، تحت تأثیر عواملی هم چون 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.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۰	
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳	مواد و روش‌ها: براساس شاخص دومارتن، دو منطقه نماینده اقلیم‌های نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای در استان ایلام انتخاب شدند. برای انجام این پژوهش، دو توده جنگل‌کاری شده 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 آهک) و شاخص کیفیت خاک استفاده شد. مقایسه 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.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳	
واژه‌های کلیدی: استان ایلام، اقلیم، جنگل‌کاری، جنگل‌های زاگرس، عمق خاک	
	یافته‌ها: نتایج نشان داد که عمق خاک بر میزان رس، شن، رطوبت و چگالی ظاهری تأثیر معنی‌داری داشت. درحالی‌که اقلیم منطقه تنها بر رطوبت خاک و سن بر رطوبت و چگالی ظاهری از نظر آماری معنی‌دار بود. به طوری‌که 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 لایه 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 گونه غیربومی کاج تهران در اراضی تخریب‌یافته، نقش مهمی در حفاظت خاک، حفظ منابع آب، ذخیره 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 منطقه 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.

---

استناد: خانمحمدیان، یاسم، میرزایی، جواد، حیدری، مهدی، کریمیان، مهناز (۱۴۰۴). اثرات کاج تهران (*Pinus eldarica* Medw.) بر برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و کیفیت خاک (مطالعه موردی: شهرستان‌های سیروان و ایوان). نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل، ۳۲ (۴)، ۲۳-۱.

DOI: 10.22069/jwfst.2025.24230.2134



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

## مقدمه

بیش از یک سوم از سطح خشکی های کره زمین، دارای اقلیم های خشک و نیمه خشک می باشد. احیاء و بازسازی اراضی تخریب یافته این مناطق با استفاده جنگل کاری گونه های بومی و غیربومی از گذشته تاکنون از اهمیت بالایی برخوردار بوده است (۱). در راستای احیای اراضی تخریب یافته و اجرای طرح های جنگل کاری در ایران، در گذشته نیز جنگل کاری هایی با گونه های مختلف با اولویت گونه های بومی که با شرایط اکولوژیکی محلی سازگار بوده و تنوع زیستی را حفظ می کنند، انجام شده است؛ اما در موارد خاص مانند اراضی شدیداً تخریب یافته که گونه های بومی استقرار ضعیفی دارند، گونه های غیربومی سوزنی برگ مانند انواع کاج ها در زمانی که موفقیت استقرار آن ها بالا بوده، اهداف اکوسیستم را برآورده کنند و احتمال تخریب بیش تر زمین کم باشد، به عنوان گزینه های مکمل استفاده شده است (۲). این گونه ها با اهدافی چون توسعه فضاهای سبز شهری، کاهش آلودگی و بهبود شرایط زیست محیطی کاشته شده اند (۳). کاج تهران به دلیل رشد سریع، مقاومت بالا در برابر نوسانات دمایی، مناسب بودن برای اقلیم مدیترانه ای و نیمه خشک، مقاومت به کم آبی و سازگاری با شرایط سخت، گزینه مناسبی برای بازسازی اراضی تخریب یافته ایران شناخته شده است (۴، ۵).

در برخی پژوهش ها، تأثیر جنگل کاری سوزنی برگان بر ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک در مقایسه با پهن برگان مورد بررسی قرار گرفته است. حسینی و حسینی (۲۰۱۴)، گزارش کردند که حاصلخیزی خاک در توده های سوزنی برگ نسبت به جنگل طبیعی بلوط کاهش یافته است، به طوری که مقدار pH حدود ۳-۰/۵ درصد، کربن آلی ۲۰-۴ درصد، نیتروژن کل ۳۶-۲۶ درصد، فسفر آلی ۵۵-۴۷ درصد و پتاسیم قابل جذب ۲۲-۱۰ درصد کم تر از توده های طبیعی

بوده است (۶). هم چنین مهرنوش و همکاران (۲۰۲۳) بیش ترین مقدار کربن آلی و کم ترین میزان فسفر و ظرفیت تبادل کاتیونی را در توده های سوزنی برگ نسبت به پهن برگان گزارش کردند، در حالی که تفاوت معنی داری در میزان pH و هدایت الکتریکی مشاهده نشد (۷). کریمیان و همکاران (۲۰۲۳) نیز کاهش درصد رطوبت، پتاسیم و فسفر و افزایش درصد آهک و چگالی ظاهری در خاک جنگل کاری شده با سوزنی برگان (کاج تهران و سرو نقره ای) نسبت به پهن برگان را نتیجه گرفتند (۸).

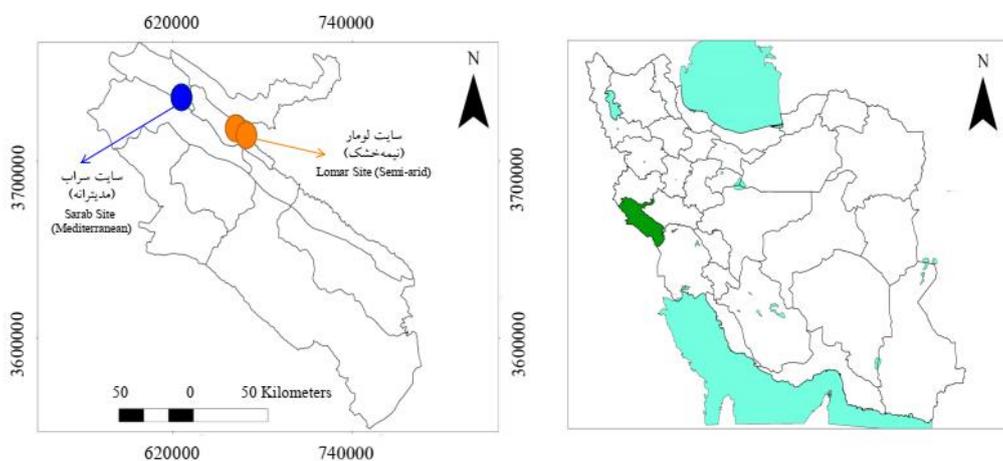
با این حال، تأثیر جنگل کاری تنها به نوع گونه درختی محدود نمی شود، ویژگی های منطقه و سن توده های جنگل کاری شده نیز بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تأثیر گذارند، به ویژه آن که این اثرات در عمق های مختلف خاک می تواند متفاوت باشد. برای نمونه، در بررسی توده های کاج در اقلیم مدیترانه ای مشخص شد که توده های جوان تر، میزان مواد آلی، رطوبت خاک، ظرفیت نگه داری آب و لاشریزه کم تری نسبت به توده های مسن تر دارند (۹). هم چنین pH خاک در جنگل کاری های ۲۰ ساله کاج، بالاتر از جنگل های ۱۰، ۴۰ و ۶۰ ساله گزارش شده، در حالی که میزان فسفر با افزایش سن جنگل افزایش و نیتروژن در جنگل های ۲۰ ساله کاهش یافته و سپس در جنگل های ۴۰ ساله افزایش پیدا کرده است. در این پژوهش، سن میانی جنگل (۲۰ تا ۴۰ سال) به عنوان نقطه عطف در تغییر ویژگی های خاک معرفی شد (۱۰). از سوی دیگر، عمق خاک نیز در توزیع عناصر غذایی و تجمع مواد آلی نقش مؤثری دارد به گونه ای که مطالعات متعدد کاهش مقدار کربن آلی و نیتروژن کل را با افزایش عمق خاک گزارش کرده اند (۱۱). مارین و همکاران (۲۰۱۹) نیز بیان کردند که تأثیر جنگل کاری با گونه کاج به عواملی چون عمق نمونه برداری و ویژگی های کاشت وابسته است (۱۲).

بالاتر از منطقه نیمه‌خشک و توده‌های ۲۰ ساله خواهد بود، هم‌چنین انتظار می‌رود لایه 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. براساس شاخص دومارتن، مناطق مورد بررسی در دو طبقه 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.

گرچه برخی از مطالعات جهانی از جمله تودور و همکاران (۲۰۲۵) با تحلیل ۲۸۱ مقاله منتشر شده، نقش مثبت جنگل‌کاری گونه‌های کاج بر خدمات اکوسیستمی از جمله کربن، ذخیره 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



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

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

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

**Table 1. Climatic, physiographic, and reforestation characteristics of the Study Sites.**

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

۲۴ ساعت ارزیابی شد. چگالی ظاهری خاک با روش پارافین و استفاده از سه کلوخه 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  $\text{pH}=7$  و فلیم‌فوتومتر، فسفر قابل جذب به روش اولسن با عصاره‌گیری بی‌کربنات سدیم و اسپکتروفوتومتر،  $\text{pH}$  با  $\text{pH}$  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.

روش نمونه‌برداری: برای انجام این پژوهش، 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) به صورت 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

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

$$M(x) = \begin{cases} 0.1 & X < L \\ 0.9 \frac{X-L}{U-L} + 0.1 & L \leq X \leq U \\ 1 & X > U \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{بیشتر} \\ \text{بیشتر} \end{matrix} \quad (2)$$

$$F(x) = \begin{cases} 0.1 & X < L \\ 0.9 \frac{X-L}{U-L} + 0.1 & L < X < U \\ 1 & U < X < L \\ 1 - 0.9 \frac{X-L}{U-L} & L < X < U \\ 0.1 & X > U \end{cases} \quad \text{سطح بهینه} \quad (3)$$

۰/۱ تا ۱ متغیر است. در نهایت، شاخص کیفیت خاک SQI برای هر نمونه‌برداری به صورت جمع وزنی زیر محاسبه می‌شود:

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i \times N_i \quad (4)$$

### 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 به‌عنوان 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 ۰-۱۰ و ۱۰-۲۰ سانتی‌متر). هم‌چنین، چگالی ظاهری در سن ۳۰ سالگی و عمق دوم هر دو منطقه اختلاف معنی‌داری نشان داد، به‌گونه‌ای 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

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

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 به‌دست 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 (۰-۱۰ و ۱۰-۲۰ سانتی‌متر) × ۵ تکرار] انجام گرفت. سپس، به‌منظور تعیین اثرات اصلی شامل منطقه، سن جنگل‌کاری و عمق خاک و نیز اثرات متقابل آن‌ها از تحلیل واریانس سه‌طرفه (GLM) و برای مقایسه 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.

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.

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 به‌دست 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

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

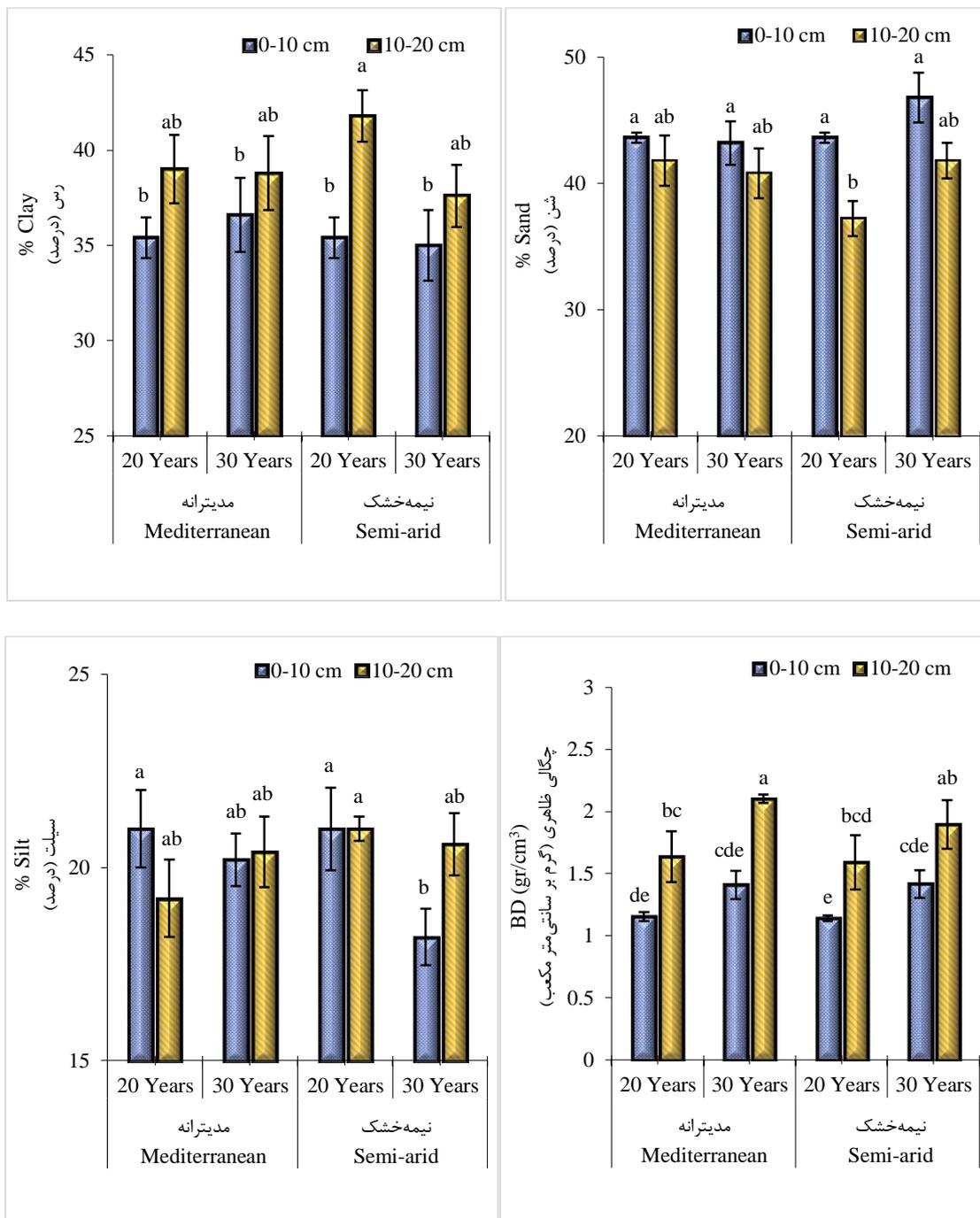
**Table 2. Result of the three- way General Linear Model (GLM) of soil physical properties (Bold numbers indicate a significant difference at the 5% level).**

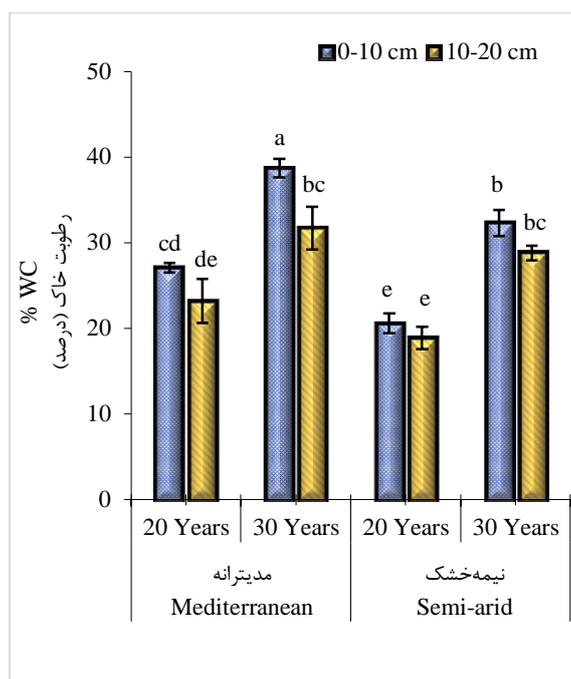
منبع تغییرات	درجه آزادی df	رس Clay		شن Sand	
		F	میانگین مربعات Mean squares	F	میانگین مربعات Mean squares
منطقه Region	1	0.000	0.000	0.000	0.000
سن Age	1	2.560	36.100	1.078	19.600
عمق خاک Soil Depth	1	11.348	160.000	<b>8.369</b>	152.100
منطقه × سن Region × Age	1	1.390	19.600	0.930	16.900
منطقه × عمق خاک Region × Soil Depth	1	0.007	0.100	0.550	10.000
سن × عمق خاک Age × Soil Depth	1	0.709	10.000	0.792	14.400
منطقه × سن × عمق خاک Region × Age × Soil Depth	1	1.199	16.900	0.050	0.900
خطا Error	32		14.100		18.175

ادامه جدول ۲-

Continue Table 2.

چگالی ظاهری Bulk density (BD)			سیلت Silt			درجه	
سطح معنی داری P-value	F	میانگین مربعات Mean squares	سطح معنی داری P-value	F	میانگین مربعات Mean squares	آزادی df	
0.524	0.414	0.041	1.000	0.000	0.000	1	منطقه Region
<b>0.003</b>	10.686	1.056	0.092	3.016	12.100	1	سن Age
<b>0.000</b>	27.990	2.767	0.639	0.224	0.900	1	عمق خاک Soil Depth
0.720	0.131	0.013	0.165	2.019	8.100	1	منطقه × سن Region × Age
0.544	0.376	0.37	0.165	2.019	8.100	1	منطقه × عمق خاک 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			درجه	
			سطح معنی داری P-value	F	میانگین مربعات Mean squares	آزادی df	
			<b>0.000</b>	19.536	252.506	1	منطقه Region
			<b>0.000</b>	84.086	1086.806	1	سن Age
			<b>0.001</b>	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.

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 قابل جذب با الگویی 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 قابل جذب 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، به طوری‌که 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)

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 (به جز pH و فسفر) و عمق خاک بر تمام ویژگی‌ها (به جز 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،

و هر دو عمق خاک (۱۰-۲۰ و ۱۰-۲۰ سانتی متر) در منطقه مدیترانه تفاوت معنی داری نشان داد. بیشترین مقدار آن برابر با ۰/۸ در عمق سطحی درختان ۳۰ ساله این منطقه بود، درحالی که در منطقه نیمه خشک، مقدار شاخص در توده های ۳۰ ساله بیش تر بود و تفاوت معنی داری بین دو عمق خاک ایجاد کرد (شکل ۳).

مقدار pH خاک یکی از عوامل کلیدی تعیین کننده کیفیت خاک محسوب می شود. پژوهش ها نتایج متفاوتی در خصوص تأثیر سن جنگل کاری ها بر pH گزارش کرده اند. برخی افزایش pH را با افزایش سن جنگل بیان کرده اند (۲۲)، درحالی که برخی دیگر کاهش تدریجی و اسیدی شدن خاک را گزارش کرده اند. در مطالعه حاضر، کاهش pH در لایه سطحی می تواند ناشی از جذب کاتیون ها توسط ریشه ها باشد که جهت حفظ بار الکتریکی منجر به آزادسازی  $H^+$  می شوند از طرفی، تولید اسیدهای آلی برای تجزیه مواد آلی انباشت شده می تواند در این امر مؤثر باشد (۲۳). در مقابل، افزایش pH با عمق خاک احتمالاً ناشی از انحلال و حرکت کربنات ها، بی کربنات ها و آبشویی کاتیون های بازی و تجمع آن ها در لایه های زیرین (عمق ۱۰-۲۰ سانتی متر) است (۲۴) هم چنین با افزایش عمق، چگالی خاک افزایش یافته و میزان نفوذپذیری کاهش می یابد که این امر تجمع یون ها را تسهیل می کند (۲۵). چندین مطالعه نشان داده اند که در خاک هایی با pH کم تر، به ویژه زمانی که مقدار مواد آلی بالا باشد، به علت حل شدن مواد معدنی و آزاد شدن یون هایی مانند کلسیم، منیزیم و پتاسیم میزان هدایت الکتریکی افزایش می یابد در مقابل خاک های قلیایی تر، در صورت نبود شوری، معمولاً هدایت الکتریکی پایین تری دارند (۲۶، ۲۷).

نتایج این پژوهش نشان داد که مقادیر کربن آلی، نیتروژن کل و پتاسیم قابل جذب با افزایش سن جنگل کاری به ویژه در منطقه مدیترانه افزایش می یابد. این یافته ها با نتایج پژوهش های مشابه در جنگل کاری های کاج هم خوانی دارد که رابطه ای مثبت میان سن جنگل و تجمع کربن آلی خاک گزارش کرده اند و بیان می کنند که کربن و نیتروژن خاک عمدتاً از طریق لاشریزه به خاک، تأمین می شوند که این عناصر ابتدا در لایه سطحی خاک انباشته شده و سپس از طریق آبشویی (۱۰، ۲۸)، فعالیت های زیستی (مانند سیستم های ریشه ای عمیق درختان و میکروارگانیسم های خاک)، بافت خاک و ترکیبات آلی محلول به عمق خاک منتقل می شوند و تحت تأثیر شرایط اقلیمی قرار گرفته که نرخ تجمع مواد آلی در لایه های عمیق تر را افزایش می دهند (۲۹). در توده های جنگل کاری جوان، تاج پوشش درختان در حال شکل گیری است و به دلیل رشد سریع و تولید خالص پایین، بازگشت عناصر غذایی به خاک و جذب آن ها زیاد است و زمان گردش عناصر غذایی خاک، سریع است اما در توده های بالغ تر، با کاهش نرخ رشد درختان و افزایش ورودی مواد آلی، فرصت بیشتری برای انباشت عناصر غذایی فراهم می شود (۳۰، ۳۱) در این شرایط ممکن است افزایش پتاسیم از تجزیه لاشبرگ ها حاصل شود (۳۲)، درحالی که در لایه های زیرین با درصد رس بالاتر، ممکن است امکان آزادسازی پتاسیم از بین ورقه های رس کاهش یافته و کمبود نسبی آن رخ می دهد (۳۳).

افزایش فسفر نیز با رشد سن جنگل کاری و فعالیت های میکروبی خاک مرتبط است. در خاک های غنی از مواد آلی، قسمت عمده فسفر قابل جذب به صورت فسفر آلی وجود دارد و تجزیه لاشبرگ و معدنی شدن مواد آلی موجب بازگشت فسفر به خاک می شود بنابراین در مناطق مدیترانه ای، شرایط مناسب رشد گیاه و بارندگی بیش تر موجب هوازگی سنگ ها و آزادسازی فسفر از منابع معدنی می گردد (۳۴، ۳۵)؛

مقدار pH خاک یکی از عوامل کلیدی تعیین کننده کیفیت خاک محسوب می شود. پژوهش ها نتایج متفاوتی در خصوص تأثیر سن جنگل کاری ها بر pH گزارش کرده اند. برخی افزایش pH را با افزایش سن جنگل بیان کرده اند (۲۲)، درحالی که برخی دیگر کاهش تدریجی و اسیدی شدن خاک را گزارش کرده اند. در مطالعه حاضر، کاهش pH در لایه سطحی می تواند ناشی از جذب کاتیون ها توسط ریشه ها باشد که جهت حفظ بار الکتریکی منجر به آزادسازی  $H^+$  می شوند از طرفی، تولید اسیدهای آلی برای تجزیه مواد آلی انباشت شده می تواند در این امر مؤثر باشد (۲۳). در مقابل، افزایش pH با عمق خاک احتمالاً ناشی از انحلال و حرکت کربنات ها، بی کربنات ها و آبشویی کاتیون های بازی و تجمع آن ها در لایه های زیرین (عمق ۱۰-۲۰ سانتی متر) است (۲۴) هم چنین با افزایش عمق، چگالی خاک افزایش یافته و میزان نفوذپذیری کاهش می یابد که این امر تجمع یون ها را تسهیل می کند (۲۵). چندین مطالعه نشان داده اند که در خاک هایی با pH کم تر، به ویژه زمانی که مقدار مواد آلی بالا باشد، به علت حل شدن مواد معدنی و آزاد شدن یون هایی مانند کلسیم، منیزیم و پتاسیم میزان هدایت الکتریکی افزایش می یابد در مقابل خاک های قلیایی تر، در صورت نبود شوری، معمولاً هدایت الکتریکی پایین تری دارند (۲۶، ۲۷).

نتایج این پژوهش نشان داد که مقادیر کربن آلی، نیتروژن کل و پتاسیم قابل جذب با افزایش سن

افزایش شاخص کیفیت خاک در توده‌های ۳۰ ساله منطقه مدیترانه 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 جنگل‌کاری کاج در مناطق مدیترانه‌ای هم‌خوانی دارد که نشان داده‌اند این جنگل‌کاری‌ها باعث بهبود زهکشی، افزایش نفوذ آب، کربن آلی و نیتروژن خاک در افق‌های سطحی می‌شوند (۳۹). بر اساس مطالعات، جنگل‌کاری‌های جوان‌تر گونه کاج (۲۰ ساله) برای ایجاد تغییرات معنی‌دار در ویژگی‌های خاک به دوره‌های زمانی طولانی‌تری نیاز دارند (۴۰).

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 علاوه بر این 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). کارا و بولات (۲۰۰۸) بیان می‌کنند که فرسایش لایه‌های سطحی می‌تواند افق‌های آهکی زیرین را آشکار کرده و موجب افزایش مقدار آهک شود (۳۸). از این رو، بیش‌تر بودن آهک در افق سطحی توده‌های ۲۰ ساله منطقه مدیترانه که بارندگی بیش‌تری دارند، توجیه‌پذیر است.

جدول ۳- تجزیه واریانس سه‌طرفه ویژگی‌های شیمیایی و کیفیت خاک (اعداد پر رنگ نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار 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 Electrical Conductivity (EC)			pH			درجه آزادی df	منبع تغییرات
سطح معنی‌داری P-value	F	میانگین مربعات Mean squares	سطح معنی‌داری P-value	F	میانگین مربعات Mean squares		
0.227	1.515	250.000	0.272	1.248	0.031	1	منطقه Region
<b>0.000</b>	52.742	8702.500	0.544	0.377	0.009	1	سن Age
<b>0.000</b>	52.742	8702.500	<b>0.000</b>	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

ادامه جدول ۳-

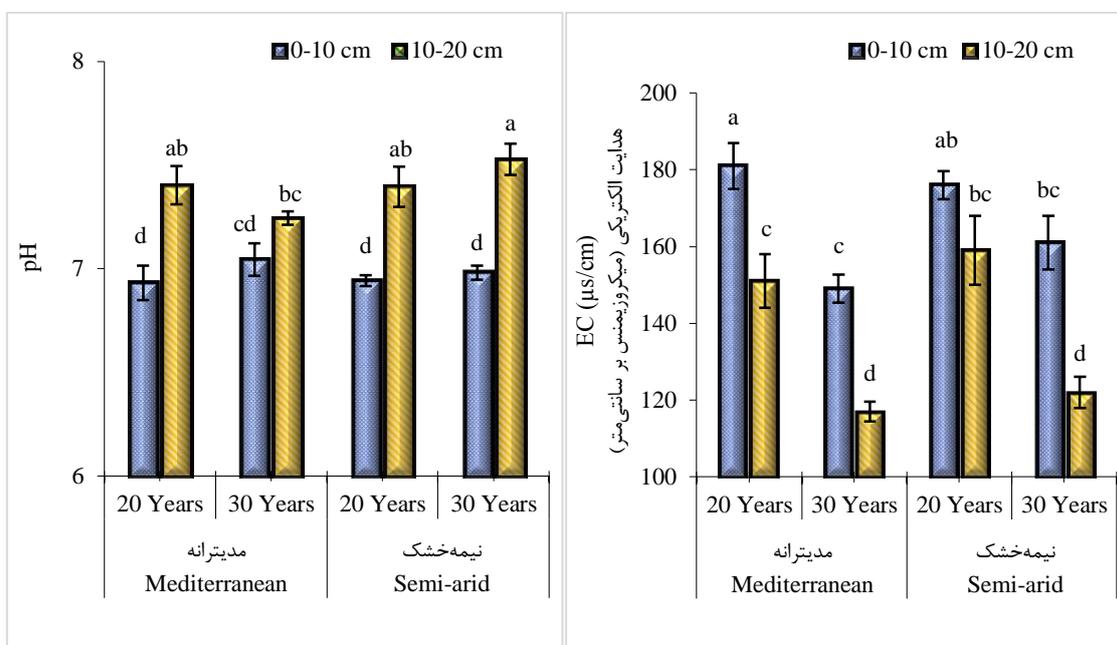
Continue Table 3.

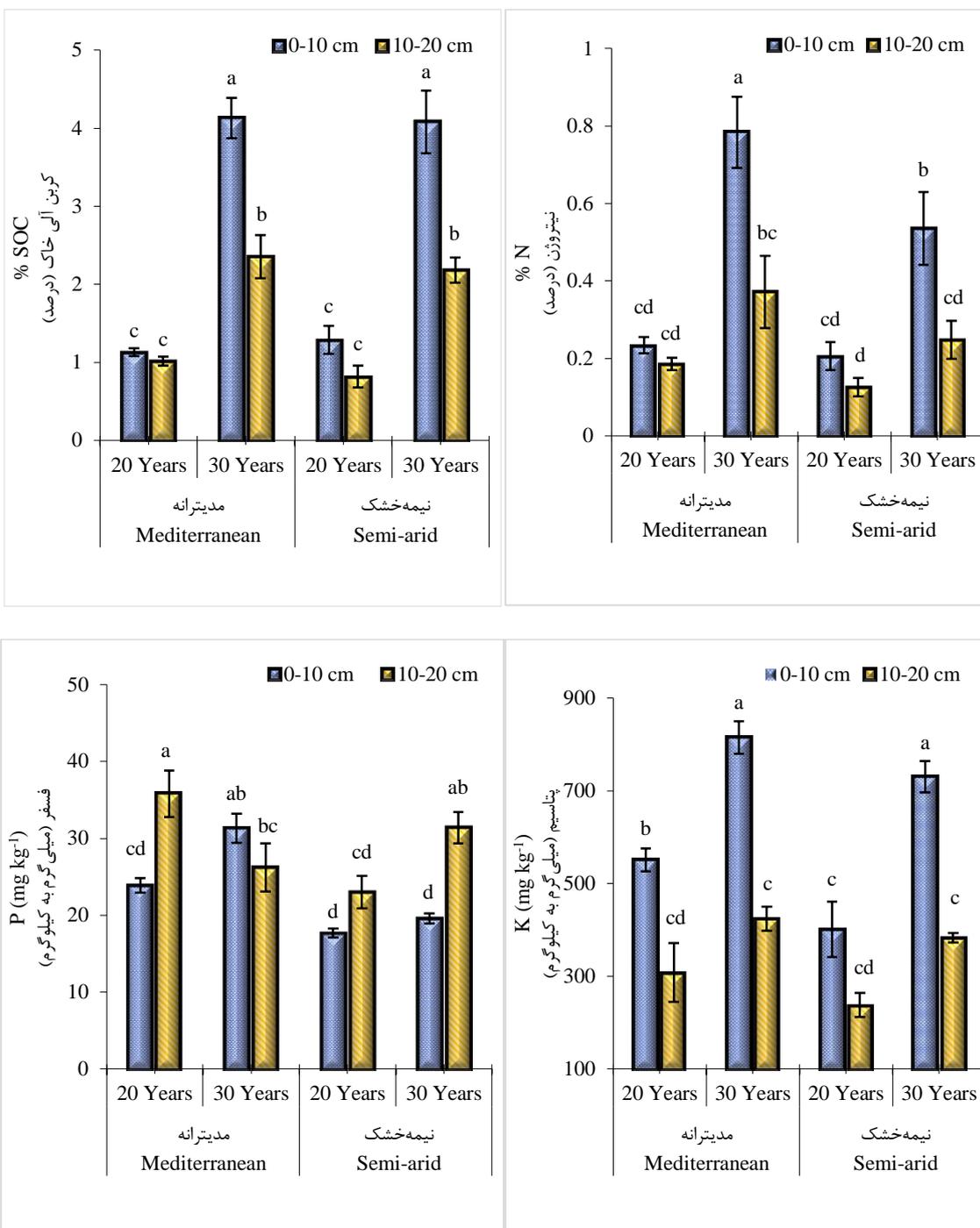
نیتروژن کل Total Nitrogen			کربن آلی خاک Soil Organic Carbon (SOC)			درجه آزادی df	
سطح معنی داری P-value	F	میانگین مربعات Mean squares	سطح معنی داری P-value	F	میانگین مربعات Mean squares		
<b>0.013</b>	6.840	0.132	0.678	0.176	0.043	1	منطقه Region
<b>0.000</b>	45.624	0.882	<b>0.000</b>	185.050	45.135	1	سن Age
<b>0.000</b>	22.163	0.428	<b>0.000</b>	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
<b>0.003</b>	10.577	0.204	<b>0.000</b>	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 Available potassium (K)			فسفر قابل جذب Available phosphorus (P)			درجه آزادی df	
سطح معنی داری P-value	F	میانگین مربعات Mean squares	سطح معنی داری P-value	F	میانگین مربعات Mean squares		
<b>0.003</b>	9.943	74822.500	<b>0.000</b>	19.831	406.406	1	منطقه Region
<b>0.000</b>	60.574	455822.500	0.167	2.001	41.006	1	سن Age
<b>0.000</b>	108.699	817960.000	<b>0.000</b>	17.420	357.006	1	عمق خاک Soil Depth
0.398	0.734	5522.500	<b>0.036</b>	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
<b>0.005</b>	9.155	68890.000	0.076	3.362	68.906	1	سن × عمق خاک Age × Soil Depth
0.745	0.108	810.000	<b>0.000</b>	16.842	345.156	1	منطقه × سن × عمق خاک Region × Age × Soil Depth
		7525.000			20.494	32	خطا Error

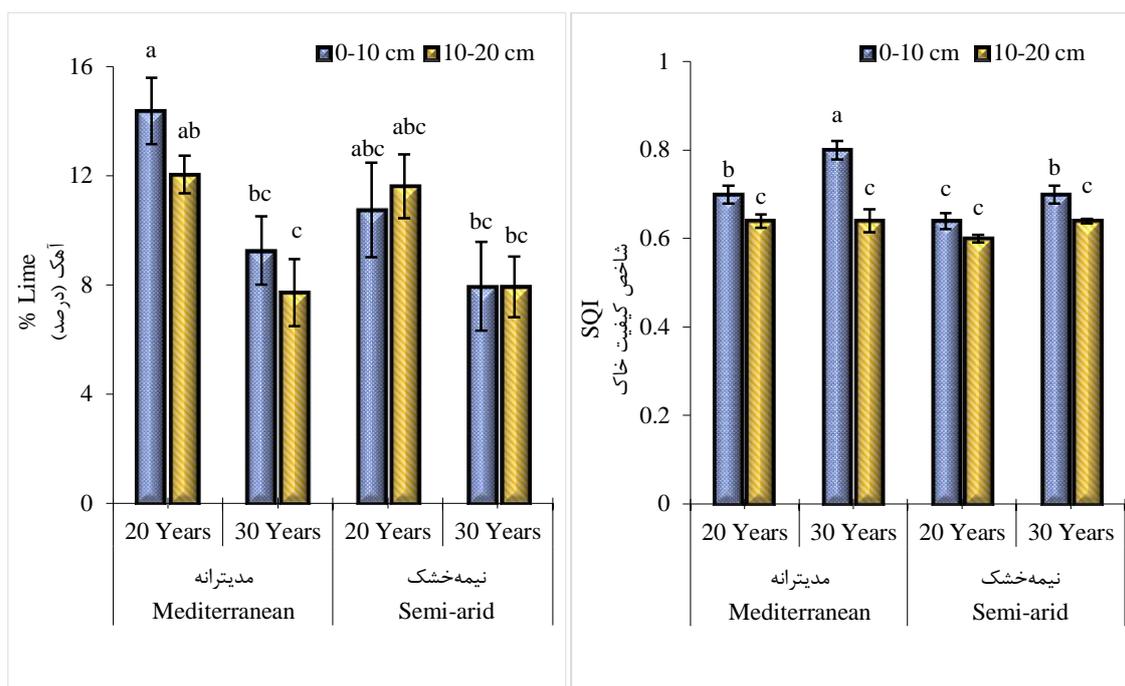
ادامه جدول ۳-

Continue Table 3.

شاخص کیفیت خاک Soil Quality Index (SQI)			آهک Lime			درجه آزادی df	
سطح معنی داری P-value	F	میانگین مربعات Mean squares	سطح معنی داری P-value	F	میانگین مربعات Mean squares		
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.

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 قابل جذب، 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 قلیایی تر و شوری بیش‌تر خاک در این تیمارهاست (شکل ۴).

شاخص کیفیت خاک به‌عنوان ابزاری کارآمد و مؤثر برای ارزیابی و پایش وضعیت خاک در

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). براساس نتایج، دو محور نخست به ترتیب ۳۶/۸۲ و ۲۳/۳۰ درصد از واریانس کل را توضیح می‌دهند، به‌طوری‌که در مجموع ۶۰/۱۲ درصد از تغییرات داده‌ها را شامل می‌شوند. این مقدار نشان‌دهنده 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 براساس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک است، مطابقت دارد (۴۱).

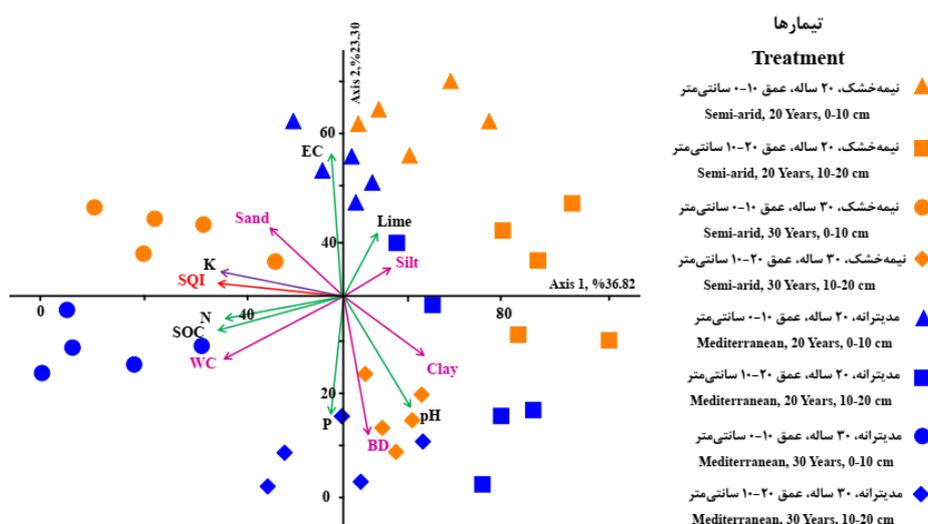
الگوی پراکنش نمونه‌ها در نمودار نشان می‌دهد که مناطق نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای تفکیک‌پذیری مشخصی از یکدیگر ندارند و نمونه‌های مربوط به هر دو منطقه در سراسر نمودار پراکنده‌اند. با این حال،

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 جنگل کاری‌های 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 <sup>ns</sup> به معنای عدم تفاوت معنی‌دار است.

**Table 4. Pearson correlation of soil physical, chemical and Quality Index. \*\* indicates significance at 0.01 level and \* indicates significance at 0.05 level, <sup>ns</sup> means no significant difference.**

متغیرها Variables	محور ۱ Axis 1	محور ۲ Axis 2
رس Clay	0.581 **	-0.340 *
شن Sand	-0.530 **	0.394 *
سیلت Silt	0.338 *	0.163 <sup>ns</sup>
چگالی ظاهری Bulk density (BD)	0.174 <sup>ns</sup>	-0.789 **
رطوبت خاک WC	-0.859 **	-0.358 *
pH	0.483 *	-0.634 **
هدایت الکتریکی Electrical Conductivity (EC)	-0.005 <sup>ns</sup>	0.848 **
کربن آلی خاک Soil Organic Carbon (SOC)	-0.902 **	-0.194 <sup>ns</sup>
نیتروژن کل Total Nitrogen	-0.898 **	-0.159 <sup>ns</sup>
فسفر قابل جذب Available phosphorus (P)	-0.092 <sup>ns</sup>	-0.672 **
پتاسیم قابل جذب Available potassium (K)	-0.882 **	0.140 <sup>ns</sup>
آهک Lime	0.246 <sup>ns</sup>	0.361 *
شاخص کیفیت خاک Soil Quality Index (SQI)	-0.902 **	0.108 <sup>ns</sup>



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.

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. در مجموع فرضیه تحقیق، مبنی بر تأثیر مثبت سن جنگل کاری و شرایط اقلیمی بر بهبود کیفیت خاک اراضی تخریب‌شده در توده‌های کاج تهران تأیید شد. با این حال، این بهبودها به‌منزله توصیه عمومی برای جنگل کاری با این گونه 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 جنگل کاری‌های کاج ممکن است در بازه‌های زمانی طولانی‌تر دستخوش تغییر شوند، پیشنهاد می‌شود روند تکامل و حاصلخیزی خاک در دوره‌های بلندمدت‌تر، مانند ۴۰، ۶۰ و ۸۰ سال پس از کاشت و مقایسه آن با گونه‌های بومی نیز مورد بررسی قرار گیرد.

### نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش هم‌راستا با سایر یافته‌های علمی درباره جنگل کاری با گونه‌های کاج در اراضی تخریب‌یافته (۱۳)، نشان داد که جنگل کاری با گونه‌ی کاج تهران (*Pinus eldarica* Medw.) در اراضی تخریب‌شده می‌تواند به بهبود چندجانبه‌ی کیفیت خاک در مناطق نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای منجر شود. سن جنگل کاری، به‌ویژه در بازه 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.

منابع

1. 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.
2. Davies, K. W., & Johnson, D. D. (2024). Dryland restoration needs suggest a role for introduced plants. *Global Ecology and Conservation*, 53, e03005.
3. Jazirei, M. H. (2009). Dryland afforestation, 560p. Tehran, Iran: University of Tehran Press. [In Persian]
4. 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.
5. 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., Hedo, 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., & 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 nutrient 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 (15<sup>th</sup> 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.

