

اثر تخریب درختچه‌زار و تبدیل آن به علفزار و اراضی زراعی بر مشخصه‌های خاک

چکیده

در مناطق نیمه‌خشک، درختچه‌زارها از مهم‌ترین انواع پوشش گیاهی بوده و نقش اساسی در پایداری چرخه عناصر غذایی خاک دارند. با وجود مطالعات متعدد درباره تأثیر پوشش‌های گیاهی بر خاک، اطلاعات مربوط به تخریب درختچه‌زارها محدود است. هدف از این پژوهش، بررسی اثر تخریب درختچه‌زار و تبدیل آن به علفزار و اراضی زراعی (گندم‌زار و جوزار) بر مشخصه‌های خاک در یک اقلیم نیمه‌خشک است. بدین منظور، ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در رویشگاه درختچه‌زار و کاربری‌های حاصل از تبدیل آن (۳۰ سال پیش) شامل علفزار، گندم‌زار و جوزار بررسی شد. در هر یک از رویشگاه‌های مورد مطالعه سه قطعه یک هکتاری با فاصله حداقل ۵۰ متر از یکدیگر تعیین شد. در هر قطعه، از چهار نقطه و در سه عمق ۱۰-۲۰، ۲۰-۳۰ و ۳۰-۴۰ سانتی‌متری خاک نمونه‌برداری انجام شد و در مجموع از هر رویشگاه ۳۶ نمونه خاک جمع‌آوری شد. نتایج نشان داد که تخریب درختچه‌زار موجب تغییر معنی‌دار ویژگی‌های فیزیکی خاک شد. به‌طوریکه جرم مخصوص ظاهری از ۱/۱۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب در درختچه‌زار به ۱/۳۸، ۱/۴۴ و ۱/۴۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب به‌ترتیب در علفزار، گندم‌زار و جوزار افزایش یافت. همچنین تخلخل خاک از ۴۶/۵۰ درصد در درختچه‌زار به حدود ۴۰ تا ۴۱ درصد و پایداری خاکدانه‌ها از ۷۳/۷۶ درصد به ۳۰/۴۰، ۳۸/۰۱ و ۳۶/۹۰ درصد در کاربری‌های تغییر یافته کاهش یافت. در بخش شیمیایی، تغییر کاربری موجب کاهش کربن آلی خاک از ۳/۱۱ درصد در درختچه‌زار به ۲/۳۲، ۲/۰۸ و ۱/۷۶ درصد، نیتروژن کل از ۳۳/۳۳ درصد به ۲۱/۲۱، ۱۷/۱۴ و ۱۴ درصد و فسفر قابل جذب از ۳۰/۷۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ۱۶/۳۴، ۱۳/۲۱ و ۱۱/۲۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم در علفزار، گندم‌زار و جوزار کاهش یافت. در مقابل، بیشترین نسبت کربن به نیتروژن در جوزار (۱۶/۶۷) مشاهده شد، در حالی که این نسبت در درختچه‌زار، علفزار و گندم‌زار به‌ترتیب ۱۰/۳۷، ۱۱/۲۵ و ۱۲/۱۷ بود. شاخص‌های زیستی نیز کاهش چشمگیری نشان دادند، به‌طوریکه زیتوده میکروبی کربن از ۳۹۳/۵۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم در درختچه‌زار به ۱۵۱/۴۷، ۱۱۶/۱۹ و ۸۸/۶۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم در علفزار، گندم‌زار و جوزار کاهش یافت. همچنین فراوانی نماتدها از ۳۴۷/۵۵ عدد در مترمربع در درختچه‌زار به ۱۲۵/۳۳، ۱۰۴/۶۹ و ۷۵/۱۳ عدد در مترمربع کاهش یافت. در مقابل، ضریب متابولیسم و شاخص دسترسی به کربن در جوزار (به‌ترتیب ۲/۶۵ و ۱/۴۷) نسبت به درختچه‌زار (۰/۹۱ و ۰/۳۷) افزایش نشان داد. فعالیت آنزیم‌های خاک نیز در اثر تغییر کاربری کاهش یافت. به‌طوریکه فعالیت اوره‌آز از ۲۱/۰۴ در درختچه‌زار به ۱۱/۷۳، ۹/۱۵ و ۷/۲۵ در علفزار، گندم‌زار و جوزار کاهش یافت. نتایج نشان داد که در مناطق نیمه‌خشک تخریب پوشش‌های درختچه‌ای و جایگزینی آن با اراضی زراعی جو، با تشدید فرآیندهای تخریب و کاهش معنادار عملکرد خاک همراه است. در همین راستا حفاظت از این رویشگاه‌ها باید در اولویت مدیریت منابع طبیعی قرار گیرد. در عین حال، در اراضی تخریب‌یافته، جایگزینی کاربری‌های زراعی کم‌تنش‌تر مانند گندم‌زار نسبت به جوزار می‌تواند تا حدی به بهبود ویژگی‌های خاک و کاهش شدت کیفیت آن کمک کند.

کلید واژه‌ها: کاربری اراضی، تخریب رویشگاه‌های طبیعی، پوشش چوبی، فعالیت آنزیمی، حاصلخیزی خاک.

- ۲۸ پوشش گیاهی به عنوان یکی از اجزای بنیادی اکوسیستم‌های زمینی، نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری فرآیندهای اکولوژیکی، حفظ تنوع
۲۹ زیستی و تنظیم عملکرد خاک ایفا می‌کند. نوع و ترکیب جوامع گیاهی از طریق تأثیر بر چرخه عناصر غذایی، تولید لاشبرگ، تنظیم رطوبت
۳۰ و دمای خاک، کاهش فرسایش و کنترل رواناب بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک اثر مستقیم دارند (کوچ و همکاران، ۱۴۰۳).
۳۱ در اکوسیستم‌های طبیعی، پوشش گیاهی نه تنها به عنوان منبع اصلی ورود مواد آلی به خاک شناخته می‌شود، بلکه با افزایش فعالیت
۳۲ میکروارگانیسم‌ها و بهبود ساختار خاک، پایداری عملکرد اکوسیستم را تضمین می‌کند (Eisenhauer et al., 2026). طبقه‌بندی پوشش‌های
۳۳ گیاهی طبیعی عمدتاً بر اساس فرم رویشی غالب و ساختار پوشش انجام می‌شود و شامل جنگل‌ها و انواع پوشش‌های مرتعی، از جمله
۳۴ علفزارها و درختچه‌زارها، است. تفاوت در فرم رویشی گیاهان، تراکم پوشش و ترکیب گونه‌ای موجب تفاوت در عملکردهای بوم‌شناختی
۳۵ این اکوسیستم‌ها می‌شود (Faber-Langendoen et al., 2016). در این میان، جنگل‌ها به دلیل نقش مؤثر در ترسیب کربن، تنظیم شرایط
۳۶ اقلیمی، حفاظت خاک و حفظ تنوع زیستی از مهم‌ترین اکوسیستم‌های خشکی محسوب می‌شوند (Murphy and Yong, 2026). از سوی
۳۷ دیگر، مراتع که بخش وسیعی از سطح زمین را پوشش می‌دهند در تأمین علوفه، کاهش فرسایش خاک، تثبیت چرخه مواد غذایی و تنظیم
۳۸ چرخه هیدرولوژیکی اهمیت زیادی دارند (Pankaj et al., 2026). در میان پوشش‌های مرتعی، درختچه‌زارها اهمیت ویژه‌ای دارند، زیرا با
۳۹ تعدیل دما و رطوبت خاک، افزایش لاشبرگ و تقویت فعالیت زیستی خاک، کیفیت خاک را بهبود می‌بخشند و از طریق افزایش کربن آلی،
۴۰ نیتروژن، فسفر و ظرفیت تبادل کاتیونی، عملکرد اکوسیستم را ارتقا می‌دهند (Myers-Smith and Hik, 2013).
۴۱ ایران با مساحت ۶۵/۱ میلیون کیلومتر مربع در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان قرار دارد و بخش قابل توجهی از اراضی آن را
۴۲ پوشش‌های گیاهی چوبی شامل درختان و درختچه‌ها و همچنین پوشش‌های علفی تشکیل می‌دهند. به‌طوریکه مراتع حدود ۸۵ میلیون
۴۳ هکتار از سطح کشور را به خود اختصاص داده‌اند (Piri et al., 2023). بخش قابل توجهی از پوشش گیاهی شمال ایران در محدوده
۴۴ جنگل‌های هیرکانی قرار دارد که به دلیل تنوع زیستی بالا، در فهرست میراث جهانی یونسکو ثبت شده است (میرآخورلو و اخوان، ۱۳۹۶).
۴۵ در این منطقه، درختچه‌زارها بخش مهمی از ساختار پوشش گیاهی مراتع را تشکیل می‌دهند که در میان آن‌ها گونه‌های سیاه ولیک
۴۶ (*Crataegus melanocarpa* M. B.) از خانواده Rosaceae و زرشک (*Berberis integerrima* Bunge.) از خانواده Berberidaceae از
۴۷ مهم‌ترین گونه‌های غالب به شمار می‌روند. جنس *Crataegus* شامل حدود ۲۵ تا ۵۰۰ گونه در جهان است که پراکنش گسترده‌ای در
۴۸ اروپا، آسیا، شمال آفریقا و آمریکای شمالی دارد (Dönmez, 2004). همچنین جنس *Berberis* شامل حدود ۴۰۰ تا ۶۰۰ گونه بوده و در
۴۹ مناطق معتدل و کوهستانی اروپا، آسیا، شمال آفریقا و آمریکای شمالی پراکنش یافته است. این گونه‌ها به دلیل سازگاری بالا با شرایط
۵۰ اقلیمی سخت، نقش مهمی در تثبیت، حمایت از فرآیندهای زیستی و ارتقای کیفیت خاک زیستگاه‌های مرتعی دارند (Maleki-Meighani
۵۱ et al., 2025). با این حال، در سال‌های اخیر این پوشش‌های گیاهی تحت تأثیر بهره‌برداری نامناسب، چرای مفرط دام و شرایط اقلیمی
۵۲ خاص (دمای بالا و رطوبت کم) مناطق مرتفع و نیمه‌خشک دچار تخریب گسترده شده‌اند (Abdollahi et al., 2023).
۵۳ با وجود اهمیت درختچه‌زارها در اکوسیستم‌های مرتعی، بخش عمده مطالعات پیشین در زمینه تغییر کاربری اراضی، عمدتاً بر ویژگی‌های
۵۴ فیزیکی و شیمیایی خاک متمرکز بوده‌اند و ویژگی‌های زیستی خاک، از جمله تراکم جانوران خاک‌زی و شاخص‌های زیتوده و کارایی
۵۵ میکروبی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، اغلب پژوهش‌های موجود به مقایسه دوگانه کاربری‌ها (مانند مرتع و جنگل در برابر
۵۶ زراعت) پرداخته‌اند (Ren et al., 2021; Zhang et al., 2025) و مقایسه هم‌زمان سه کاربری درختچه‌زار، علفزار و اراضی زراعی، به‌ویژه در
۵۷ اعماق مختلف خاک، کمتر بررسی شده است. بر این اساس هدف از این پژوهش، ارزیابی هم‌زمان اثر تخریب و تبدیل درختچه‌زار به علفزار
۵۸ و اراضی زراعی (گندم و جو) بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در اعماق مختلف بود. فرض بر این است که تغییر کاربری از
۵۹ درختچه‌زار به کاربری‌های ثانویه، به‌ویژه اراضی زراعی، منجر به تخریب معنادار ویژگی‌های فیزیکی، کاهش عناصر غذایی و ماده آلی و
۶۰ افت شاخص‌های زیستی و میکروبی خاک خواهد شد. با این حال، انتظار می‌رود شدت این تخریب متناسب با نوع کاربری جایگزین متفاوت
۶۱ باشد، به‌طوری‌که تبدیل درختچه‌زار به علفزار در مقایسه با تبدیل آن به اراضی زراعی، به دلیل حفظ نسبی پوشش گیاهی طبیعی، اثرات
۶۲ تخریبی کمتری بر ویژگی‌های خاک بر جای بگذارد.

۶۳

۶۴

۶۵

۶۶

۶۷

۶۸

۶۹

۷۰

۷۱

۷۲

۷۳

۷۴

۷۵

۷۶

۷۷

۷۸

۷۹

۸۰

۸۱

۸۲

۸۳

۸۴

۸۵

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد بررسی در رویشگاه بیلاقی پی‌ده (بخش کجور، جنوب‌شرقی نوشهر) در زون البرز مرکزی با عرض جغرافیایی $36^{\circ}27'14''$ تا $36^{\circ}27'16''$ شمالی و طول جغرافیایی $51^{\circ}46'24''$ تا $51^{\circ}46'27''$ شرقی واقع شده است. این منطقه به دلیل وجود هم‌زمان رویشگاه طبیعی درختچه‌زار با کاربری‌های حاصل از تغییر آن (علفزار، گندم‌زار و جوزار) و نیز شرایط فیزیوگرافی نسبتاً یکنواخت انتخاب شد تا امکان مقایسه پوشش‌ها فراهم شده و تغییرات خاک عمدتاً ناشی از نوع پوشش گیاهی باشد. ارتفاع متوسط منطقه ۱۸۰۰ متر، بارندگی سالانه ۳۹۰ میلی‌متر و تبخیر سالانه بیش از ۱۳۰۰ میلی‌متر است. بر اساس شاخص دومارتن (De Martonne, 1926) اقلیم منطقه نیمه‌خشک است. دمای منطقه بین ۵ درجه سانتی‌گراد (بهمن) تا ۲۲ درجه سانتی‌گراد (مرداد) در نوسان است. خاک منطقه بر اساس رده‌بندی USDA (2014) عمدتاً آلفی‌سول با شیب یک‌جانبه و ۱۵ درصد جنوبی است. پوشش غالب منطقه گونه‌های درختچه‌ای سیاه‌ولیک و زرشک است، هرچند طی حدود سی سال گذشته تغییر کاربری موجب ظهور سایر پوشش‌های اراضی نیز شده است (قادری، ۱۴۰۲). در پژوهش حاضر، چهار نوع پوشش گیاهی زیر مورد توجه قرار گرفت:

۱- درختچه‌زار با غالبیت سیاه‌ولیک (*Crataegus melanocarpa* M. B.) و زرشک (*Berberis integerrima* Bunge.)

پوشش طبیعی منطقه با غالبیت سیاه‌ولیک و زرشک که به عنوان شاهد و مرجع مقایسه انتخاب شد.

۲- علفزار با غالبیت علف‌گندمی (*Agropyron longiaristatum* Bolss) و علف‌پشمکی (*Bromus tomentolus* Bioss.)

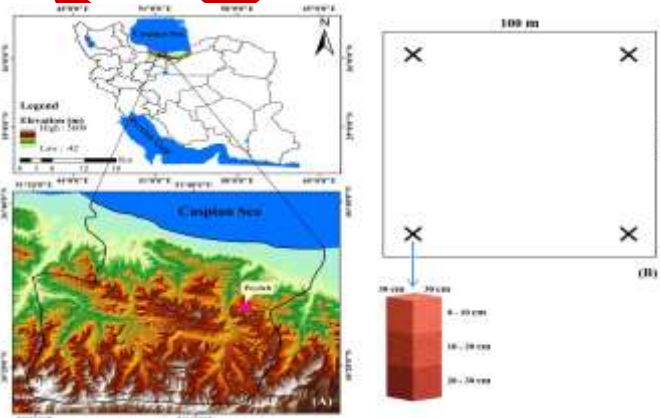
رویشگاهی که در اثر تخریب درختچه‌زار و استقرار پوشش گیاهی علفی ایجاد شده و به منظور بررسی اثر تغییر پوشش طبیعی به پوشش علفی بر ویژگی‌های خاک مورد مطالعه قرار گرفت.

۳- اراضی زراعی گندم (*Triticum aestivum* L.)

اراضی زراعی حاصل از تغییر کاربری درختچه‌زار که به منظور بررسی اثر کشت گندم بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک انتخاب شد.

۴- اراضی زراعی جو (*Hordeum vulgare* L.)

اراضی زراعی حاصل از تغییر کاربری درختچه‌زار که به منظور بررسی اثر کشت جو بر ویژگی‌های خاک انتخاب شد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و روش نمونه برداری

روش نمونه‌برداری و تجزیه آزمایشگاهی

برای بررسی اثرات پوشش‌های اراضی بر ویژگی‌های خاک، در هر رویشگاه سه قطعه یک‌هکتاری با فاصله حداقل ۵۰۰ متر از یکدیگر و با حداقل اختلاف در ارتفاع، شیب و جهت شیب انتخاب شد. در هر قطعه، چهار نمونه خاک به صورت مستقل از چهار گوشه (به ابعاد 30×30 سانتی‌متر) و از سه عمق ۰-۱۰، ۱۰-۲۰ و ۲۰-۳۰ سانتی‌متری برداشت شد. با توجه به اینکه بیشترین تأثیر تغییر کاربری اراضی

بر خاک در لایه‌های سطحی رخ می‌دهد و با افزایش عمق کاهش می‌یابد (Jobbágy and Jackson, 2000)، عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری به‌عنوان محدوده مورد بررسی انتخاب شد. نمونه‌ها به‌صورت مجزا (بدون تهیه نمونه مرکب) کدگذاری و به آزمایشگاه منتقل شدند. بدین ترتیب از هر رویشگاه در مجموع ۳۶ نمونه خاک (۳ قطعه 4×4 نقطه 3×3 عمق) تجزیه و تحلیل شد. نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند و بخشی نیز تا زمان انجام آزمایش‌های زیستی در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد (Kooch and Noghre, 2020). رطوبت خاک به روش توکلی و همکاران، (۱۳۹۷) و دمای خاک با دماسنج دیجیتال اندازه‌گیری شد (Zancan et al., 2006). جرم مخصوص ظاهری به روش کلوخه، جرم مخصوص حقیقی به روش پیکنومتری و تخلخل خاک بر این اساس محاسبه شد (Blake and Hartge, 1986). پایداری خاکدانه‌ها به روش یودر (Kemper and Rosenau, 1986) و بافت خاک به روش هیدرومتری تعیین شد (Six et al., 2002). واکنش خاک (pH) به روش پتانسیومتری، هدایت الکتریکی با EC سنج، کربن آلی به روش والکلی بلاک (Allison, 1975) و نیتروژن کل به روش کج‌دال اندازه‌گیری شد (Bremner and Mulvaney, 1982). ترسیب کربن و نیتروژن با استفاده از روابط مربوطه محاسبه شد (Wang and Dalal, 2006). فسفر قابل جذب به روش اولسن و پتاسیم، کلسیم و منیزیم قابل جذب به روش جذب اتمی اندازه‌گیری شدند (Bower et al., 1952). کربن و نیتروژن آلی ذره‌ای به روش کاهش وزن (Nelson and Sommers, 1983) و کربن و نیتروژن آلی محلول با دستگاه Shimadzu TOC-550A (TOC) تعیین شد. فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز، فسفاتاز، آریل سولفاتاز و اینورتاز با روش انکوباسیون آزمایشگاهی سنجش شد (Alef and Nannipieri, 1995). کرم‌های خاکی بر اساس ویژگی‌های ریخت‌شناسی شناسایی، خشک و توزین شدند (بیرانوند و کوچ، ۱۳۹۵). کنه‌ها و پادمان‌ها به روش قیف برلیز، نماتدها به روش قیف بیرمن و سانتیفریوژ (Alef and Nannipieri, 1995)، و پروتوزوئرها با میکروسکوپ شمارش شدند. جمعیت باکتری و قارچ خاکزی به روش کشت تعیین شد (Wollum, 1982). تنفس پایه به روش بطری دربسته و تنفس برانگیخته با افزودن گلوکز اندازه‌گیری شد (Anderson and Domsch, 1990). کربن و نیتروژن زی‌توده میکروبی به روش تدخین استخراج تعیین شد (Brookes et al., 1985). آمونیوم به روش Indophenol blue و نترات با دستگاه فتومتر اندازه‌گیری شدند (Robertson et al., 1999).

تحلیل آماری داده‌ها

برای بررسی پیش‌فرض‌های تحلیل آماری، نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و همگنی واریانس‌ها با آزمون لون بررسی شد که نشان داد کلیه متغیرهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک (شامل متغیرهای شمارشی زیستی) از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. اثرات اصلی و متقابل نوع رویشگاه (چهار سطح) و عمق خاک (سه سطح، ۰-۱۰، ۱۰-۲۰ و ۲۰-۳۰ سانتی‌متر) با تجزیه واریانس دوطرفه (Two-way ANOVA) بررسی و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن انجام شد. کلیه تحلیل‌های آماری با نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام گرفت.

نتایج

نتایج تجزیه واریانس نشان دهنده تفاوت آماری معنی‌دار اکثر ویژگی‌های خاک در بین رویشگاه‌های مورد بررسی است (جدول ۱).

جدول ۱. نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) اثرات کاربری زمین و عمق بر خواص خاک

ویژگی‌های خاک	رویشگاه		عمق		رویشگاه $\times$ عمق	
	F value	sig	F value	sig	F value	sig
OM ماده آلی	۲۱/۳۵۹	۰/۰۰	۲۲/۱۵۰	۰/۰۰	۱/۷۱۵	۰/۱۲۲
جرم مخصوص ظاهری	۱۷/۷۹۰	۰/۰۰	۶/۲۰۱	۰/۰۰۳	۰/۶۰۹	۰/۷۲۳
جرم مخصوص حقیقی	۰/۳۴۷	۰/۷۹۱	۰/۱۲۴	۰/۸۸۴	۰/۲۸۰	۰/۹۴۶
تخلخل	۸/۹۶۲	۰/۰۰	۴/۴۴۹	۰/۰۱۳	۰/۸۹۷	۰/۴۹۹
پایداری	۱۳۱/۰۶۱	۰/۰۰	۶/۶۳۶	۰/۰۰۲	۰/۲۰۹	۰/۹۷۴
شن	۲۴/۸۹۳	۰/۰۰۹	۱۰/۲۱۸	۰/۰۰۰	۰/۱۷۱	۰/۹۸۴
سیلت	۱/۸۱۱	۰/۱۴۸	۰/۸۰۹	۰/۴۴۷	۰/۱۰۳	۰/۹۹۶

ویژگی‌های خاک	رویشگاه		عمق		رویشگاه × عمق	
	F value	sig	F value	sig	F value	sig
رس	۶۴/۶۵۳	+/++	۶/۵۸۲	+/۰۰۲	۰/۴۲۳	۰/۸۶۳
رطوبت خاک	۱/۳۸۰	+/۲۵۲	۳۱/۶۰۶	+/۰۰	۰/۵۹۹	۱/۰۰۰
دمای خاک	۳۳/۶۳۹	+/++	۳/۰۳۶	۰/۰۵۱	۰/۹۸۷	۰/۷۳۱
واکنش خاک	۱۴/۱۱۸	+/++	۲/۴۵۹	۰/۰۸۹	۰/۴۰۰	۰/۸۷۸
هدایت الکتریکی	۱۰/۶۹۱	+/++	۲/۰۸۹	۰/۱۲۸	۰/۱۴۶	۰/۹۹۰
کربن	۲۱/۳۸۰	+/++	۲۲/۱۶۴	+/۰۰	۱/۷۱۸	۰/۱۲۲
ترسیب کربن	۸/۶۲۹	+/++	۱۲/۶۱۷	+/۰۰	۰/۶۲۷	۰/۷۰۹
نیترژن کل	۳۹/۲۹۷	+/++	۱۹/۲۲۴	+/۰۰	۰/۶۷۴	۰/۶۷۱
ترسیب نیترژن	۱۹/۸۸۱	+/++	۱۱/۰۹۴	+/۰۰	۰/۰۹۹	۰/۹۹۶
نسبت کربن به نیترژن	۳/۵۳۳	+/۰۰۹	۱/۶۱۱	۰/۲۰۳	۰/۳۸۸	۰/۹۲۶
فسفر	۵۰/۱۸۷	+/++	۱۹/۷۷۲	+/۰۰	۰/۶۰۳	۰/۷۱۳
پتاسیم	۱۰۳/۳۲۴	+/++	۴۱/۱۲۹	+/۰۰	۲/۰۱۲	۰/۰۴۸
کلسیم	۶۵/۸۶۲	+/++	۱۷/۱۸۵	+/۰۰	۷/۳۱۷	+/۰۰
منیزیم	۸۶/۳۳۳	+/++	۱۱۹/۰۲۰	+/۰۰	۵/۵۸۴	+/۰۰
فراوانی اپی ژئیک	۱۲/۱۲۸	+/++	۳۷/۹۳۱	+/۰۰	۱۲/۱۳۸	+/۰۰
زی توده اپی ژئیک	۱۷/۰۸۸	+/++	۴۲/۰۸۹	+/۰۰	۱۷/۰۸۸	+/۰۰
فراوانی آنسئیک	۱۰/۴۶۶	+/++	۷/۰۵۱	۰/۰۰۱	۱/۵۸۸	۰/۱۵۵
زی توده آنسئیک	۱۳/۸۹۴	+/++	۶/۶۳۸	۰/۰۰۲	۰/۹۷۰	۰/۴۴۸
فراوانی اندوژئیک	۲۵/۴۴۰	+/++	۲۵/۸۰۳	+/۰۰	۵/۱۶۸	+/۰۰
زی توده اندوژئیک	۳۲/۸۵۹	+/++	۳۴/۰۴۰	+/۰۰	۶/۳۰۸	+/۰۰
فراوانی کل کرم خاکی	۴۵/۲۸۹	+/++	۶/۷۰۹	۰/۰۰۲	۱/۳۳۲	۰/۲۵۲
زی توده کل کرم خاکی	۵۴/۰۹۴	+/++	۱۲/۶۵۸	+/۰۰	۱/۶۰۰	۰/۱۵۲
فراوانی کنه خاکزی	۱۰۱/۴۶۳	+/++	۱۲۶/۵۷۸	+/۰۰	۳/۹۰۰	+/۰۰
فراوانی پادمان خاکزی	۷۷/۲۳۲	+/++	۱۸۳/۰۷۲	+/۰۰	۱۷/۸۱۰	+/۰۰
نماتد کل خاکزی	۸۰/۷۵۴	+/++	۷۰/۳۹۶	+/۰۰	۱۳/۶۲۰	۰/۰۲۴
جمعیت باکتری	۴۶/۹۶۷	+/++	۶۴/۲۶۶	+/۰۰	۲/۱۱۷	۰/۰۵۵
جمعیت قارچ	۵۶/۶۱۹	+/++	۵۱/۲۲۸	+/۰۰	۳/۶۷۹	۰/۰۰۲
آمونیم	۲۹/۰۱۱	+/++	۴۱/۱۸۱	+/۰۰	۴/۸۱۰	+/۰۰
نیترات	۴۶/۶۸۶	+/++	۷۷/۷۰۱	+/۰۰	۵/۶۷۳	+/۰۰
تنفس پایه	۳۴/۲۰۴	+/++	۶۱/۱۷۱	+/۰۰	۲/۸۵۳	۰/۰۱۲
تنفس میکروبی برانگیخته	۲۷/۶۱۷	+/++	۴۶/۲۲۸	+/۰۰	۰/۲۸۲	۰/۹۴۵
کربن زی توده میکروبی	۷۸/۸۳۰	+/++	۳۴/۲۷۶	+/۰۰	۱/۸۲۸	۰/۰۹۸
زی توده میکروبی نیترژن	۱۸۲/۴۳۹	+/++	۳۳/۰۹۳	+/۰۰	۱/۳۰۸	۰/۲۵۸
زی توده میکروبی فسفر	۱۳۴/۶۰۱	+/++	۳۱/۳۷۵	+/۰۰	۱۱/۸۴۵	۰/۰۰۰
نسبت زی توده میکروبی نیترژن به نیترژن کل	۱۰/۸۹۰	+/++	۱/۱۹۵	۰/۳۰۶	۰/۳۳۵	۰/۹۱۷
نسبت زی توده میکروبی فسفر به فسفر کل	۱۶/۷۹۸	+/++	۶/۱۱۰	۰/۰۰۳	۰/۸۷۱	۰/۵۱۸
نسبت زی توده میکروبی کربن به زی توده میکروبی	۰/۶۸۴	+/++	۱/۵۸۲	۰/۲۰۹	۰/۲۱۵	۰/۹۷۲
نسبت زی توده میکروبی کربن به زی توده میکروبی فسفر	۱/۳۷۸	+/++	۴/۳۳۴	۰/۰۱۵	۲/۰۹۸	۰/۰۵۸
نسبت زی توده میکروبی نیترژن به زی توده میکروبی فسفر	۰/۵۰۰	+/++	۰/۶۶۵	۰/۵۱۶	۲/۰۷۰	۰/۰۶۱
ضریب متابولیکی	۶/۷۴۷	+/++	۱/۹۳۲	۰/۱۴۹	۲/۴۴۷	۰/۰۲۸
سهم میکروبی	۲۳/۶۶۶	+/++	۶/۰۱۶	۰/۰۰۳	۱/۶۰۶	۰/۱۵۰

ویژگی‌های خاک	رویشگاه		عمق		رویشگاه × عمق	
	F value	sig	F value	sig	F value	sig
قابلیت دسترسی کربن	۴/۵۴۳	* / ۰.۰۵	۴/۹۶۲	۰ / ۰.۰۸	۳/۳۰۰	۰ / ۰.۰۵
آنزیم اوره‌آز	۵۸/۶۵۲	* / ۰.۰۰	۳۵/۱۷۱	۰ / ۰.۰۰	۴/۴۹۳	۰ / ۰.۰۳
آنزیم اسید فسفاتاز	۴۶/۲۳۹	* / ۰.۰۰	۲۵/۵۴۲	۰ / ۰.۰۰	۲/۳۳۳	۰ / ۰.۳۶
آنزیم آریل سولفاتاز	۱۲۰/۸۶۴	* / ۰.۰۰	۳۷/۴۹۸	۰ / ۰.۰۰	۸/۸۰۹	۰ / ۰.۰۰
آنزیم اینورتاز	۵۵/۶۶۲	* / ۰.۰۰	۲۸/۸۰۳	۰ / ۰.۰۰	۳/۶۴۹	۰ / ۰.۰۲
کربن آلی ذره‌ای	۹۷/۴۵۰	* / ۰.۰۰	۱۳/۹۵۸	۰ / ۰.۰۰	۲/۰۰۷	۰ / ۰.۰۰
نیتروژن آلی ذره‌ای	۷۲/۵۶۵	* / ۰.۰۰	۲۵/۵۴۹	۰ / ۰.۰۰	۱/۷۱۲	۰ / ۰.۴۳
نسبت کربن به نیتروژن آلی ذره‌ای	۳/۷۷۳	* / ۰.۰۱۲	۳/۷۰۸	۰ / ۰.۲۷	۱/۴۲۵	۰ / ۰.۵۱
کربن آلی محلول	۱۴۶/۸۱۷	* / ۰.۰۰	۵۵/۷۰۲	۰ / ۰.۳۴	۲/۷۰۲	۰ / ۰.۱۷
نیتروژن آلی محلول	۴۶/۰۳۸	* / ۰.۰۰	۱۴/۰۵۶	۰ / ۰.۰۰	۳/۰۰۴	۰ / ۰.۰۹
نسبت کربن به نیتروژن آلی محلول	۲/۸۹۱	* / ۰.۰۳۸	۷/۵۷۱	۰ / ۰.۰۱	۰/۶۶۷	۰ / ۰.۶۷۷

مقادیر پررنگ نشان دهنده اختلاف آماری معنی‌دار هستند ($p < 0.05$).

تأثیر تغییر کاربری بر ویژگی‌های فیزیکی خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان دهنده تفاوت آماری معنی‌دار در اکثر ویژگی‌های فیزیکی خاک در بین رویشگاه‌های مورد بررسی است. در مقایسه با رویشگاه شاهد (درختچه‌زار)، تبدیل پوشش گیاهی موجب افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک به میزان ۰/۲۰، ۰/۲۶ و ۰/۲۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب به ترتیب در گراس‌لند، گندم‌زار و جوزار شد. همچنین، پایداری خاکدانه‌ها بیشترین حساسیت را به تغییر پوشش نشان داد، به‌طوری‌که در مقایسه با شاهد، به ترتیب ۳۳/۴۶، ۲۵/۷۵ و ۳۶/۸۶ درصد در گراس‌لند، گندم‌زار و جوزار کاهش یافت. تغییر کاربری همچنین سبب کاهش رس و افزایش شن خاک شد. به‌طوریکه مقدار رس در جوزار نسبت به درختچه‌زار ۱۹/۹۵ درصد کاهش و مقدار شن ۱۵/۷۲ درصد افزایش یافت (جدول ۲).

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی خاک (میانگین $\pm$ اشتباه معیار) براساس نوع کاربری زمین

ویژگی‌های خاک	عمق (سانتی‌متر)	درختچه‌زار	گراس‌لند با سابقه درختچه‌زار	گندم‌زار با سابقه درختچه‌زار	جوزار با سابقه درختچه‌زار
جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۰ - ۱۰	۱/۰۸ $\pm$ ۰/۰۸ Bb	۱/۳۴ $\pm$ ۰/۰۷ Aa	۱/۳۸ $\pm$ ۰/۰۵ Aa	۱/۳۶ $\pm$ ۰/۰۴ Ab
	۱۰ - ۲۰	۱/۲۲ $\pm$ ۰/۰۳ Ba	۱/۴۰ $\pm$ ۰/۰۳ Aa	۱/۴۸ $\pm$ ۰/۰۶ Aa	۱/۳۹ $\pm$ ۰/۰۴ Aab
	۲۰ - ۳۰	۱/۲۵ $\pm$ ۰/۰۷ Ba	۱/۴۰ $\pm$ ۰/۰۲ Aa	۱/۴۶ $\pm$ ۰/۰۳ Aa	۱/۵۰ $\pm$ ۰/۰۴ Aa
	میانگین	۱/۱۸ $\pm$ ۰/۰۲ B	۱/۳۸ $\pm$ ۰/۰۲ A	۱/۴۴ $\pm$ ۰/۰۳ A	۱/۴۲ $\pm$ ۰/۰۲ A
	۰ - ۱۰	۲/۴۰ $\pm$ ۰/۰۶ Aa	۲/۴۶ $\pm$ ۰/۰۷ Aa	۲/۴۵ $\pm$ ۰/۰۸ Aa	۲/۴۷ $\pm$ ۰/۰۹ Aa
جرم مخصوص حقیقی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۱۰ - ۲۰	۲/۴۰ $\pm$ ۰/۰۷ Aa	۲/۳۸ $\pm$ ۰/۱۱ Aa	۲/۴۳ $\pm$ ۰/۰۶ Aa	۲/۵۱ $\pm$ ۰/۰۶ Aa
	۲۰ - ۳۰	۲/۴۲ $\pm$ ۰/۰۳/ Aa	۲/۴۰ $\pm$ ۰/۰۴ Aa	۲/۴۷ $\pm$ ۰/۰۶ Aa	۲/۳۹ $\pm$ ۰/۱۰ Aa
	میانگین	۲/۴۰ $\pm$ ۰/۰۳ A	۲/۴۱ $\pm$ ۰/۰۴ A	۲/۴۵ $\pm$ ۰/۰۳ A	۲/۴۶ $\pm$ ۰/۰۵ A
	۰ - ۱۰	۵۴/۷۴ $\pm$ ۱/۱۸ Aa	۴۵/۲۲ $\pm$ ۲/۸۹ Ba	۴۲/۹۲ $\pm$ ۲/۷۱ Ba	۴۴/۳۰ $\pm$ ۲/۷۴ Ba
	۱۰ - ۲۰	۴۸/۳۴ $\pm$ ۱/۸۷ Ab	۳۹/۳۰ $\pm$ ۳/۷۵ ABa	۳۸/۶۳ $\pm$ ۳/۷۶ Ba	۴۳/۹۴ $\pm$ ۲/۴۳ ABa
تخلخل (درصد)	۲۰ - ۳۰	۴۸/۳۰ $\pm$ ۲/۷۲ Ab	۴۱/۲۸ $\pm$ ۱/۵۳ Ba	۴۰/۶۰ $\pm$ ۱/۳۵ Ba	۳۵/۸۳ $\pm$ ۳/۲۶ Ba
	میانگین	۵۰/۴۶ $\pm$ ۱/۲۴ A	۴۱/۹۳ $\pm$ ۱/۶۶ B	۴۰/۷۱ $\pm$ ۱/۵۹ B	۴۱/۳۶ $\pm$ ۱/۷۲ B
	۰ - ۱۰	۶۹/۷۹ $\pm$ ۳/۹۵ Aa	۳۶/۶۶ $\pm$ ۲/۲۷ Ba	۳۴/۸۲ $\pm$ ۲/۸۸ Bb	۳۴/۳۵ $\pm$ ۳/۴۲ Ba
	۱۰ - ۲۰	۷۳/۷۱ $\pm$ ۳/۱۲ Aa	۳۹/۵۲ $\pm$ ۱/۸۷ Bab	۳۶/۹۴ $\pm$ ۱/۳۳ Bab	۳۷/۸۸ $\pm$ ۲/۰۶ Ba
	۲۰ - ۳۰	۷۷/۷۷ $\pm$ ۱/۹۷ Aa	۴۴/۷۳ $\pm$ ۲/۳۳ Ba	۴۲/۲۶ $\pm$ ۲/۲۲ Ba	۳۸/۴۷ $\pm$ ۳/۴۳ Ba
پایداری (درصد)	میانگین	۷۳/۷۶ $\pm$ ۱/۸۳ A	۴۰/۳۰ $\pm$ ۱/۳۴ B	۳۸/۰۱ $\pm$ ۱/۳۶ B	۳۶/۹۰ $\pm$ ۱/۷۳ B
	۰ - ۱۰	۳۴/۵۸ $\pm$ ۱/۴۱ Ba	۳۶/۵۸ $\pm$ ۲/۱۳ Aa	۳۸/۳۳ $\pm$ ۲/۰۴ Aa	۴۰/۹۱ $\pm$ ۳/۰۸ Aa
	شن (درصد)				

	۱۰ - ۲۰	۲۰/۹۱ ± ۱/۲۰	Bb	۳۰/۵۰ + ۲/۲۵	Ab	۳۲/۱۶ + ۱/۶۹	Ab	۳۶/۵۰ + ۳/۵۸	Aa
	۲۰ - ۳۰	۱۹/۵۰ ± ۰/۷۶	Bb	۲۷/۹۱ + ۱/۹۳	Ab	۲۹/۴۱ + ۱/۸۷	Ab	۳۴/۷۵ + ۳/۷۵	Aa
	میانگین	۲۱/۶۶ ± ۰/۷۴	A	۳۱/۶۶ + ۱/۳۳	B	۳۳/۳۰ + ۱/۲۲	B	۳۷/۳۸ + ۲	A
	۰ - ۱۰	۱/۵۹ ± ۵۳/۳۳	Aa	۲/۴۶ + ۳۷/۲۵	Aa	۲/۱۹ + ۳۸/۸۳	Aa	۳۷/۵۸ + ۲/۵۹	Aa
سیلت (درصد)	۱۰ - ۲۰	۳۵/۴۱ ± ۱/۹۹	Aa	۳۷/۵۸ + ۲/۷۹	Aa	۴۱/۱۶ + ۳/۰۷	Aa	۴۱/۴۱ + ۳/۹۲	Aa
	۲۰ - ۳۰	۳۶/۷۵ ± ۱/۷۶	Aa	۳۸/۹۱ + ۲/۵۲	Aa	۴۲/۴۱ + ۲/۸۱	Aa	۴۱/۱۶ + ۵/۰۸	Aa
	میانگین	۳۵/۸۳ ± ۱	B	۳۷/۹۱ + ۱/۴۶	AB	۴۰/۸۰ + ۱/۵۴	A	۴۰/۰۵ + ۲/۲۶	AB
	۰ - ۱۰	۴۰/۰۸ ± ۰/۹۰	Aa	۲۶/۱۶ + ۲/۰۵	Bb	۲۲/۸۳ + ۱/۱۶	BCb	۲۱/۵۰ + ۱/۵۳	Ca
رس (درصد)	۱۰ - ۲۰	۴۳/۶۶ ± ۱/۴۲	Aa	۳۱/۹۱ + ۱/۷۳	Ba	۲۶/۶۶ + ۲/۱۲	BCab	۲۲/۰۸ + ۳/۲۵	Ca
	۲۰ - ۳۰	۴۳/۷۵ ± ۱/۵۳	Aa	۳۳/۱۶ + ۱/۳۳	Ba	۲۸/۱۶ + ۱/۸۱	BC	۲۴/۰۸ + ۲/۴۴	Ca
	میانگین	۴۲/۵۰ ± ۰/۷۹	A	۳۰/۴۱ + ۱/۱۰	B	۲۵/۸۸ + ۱/۰۵	C	۲۲/۵۵ + ۱/۴۱	D
	۰ - ۱۰	۲۶/۸۶ ± ۳/۵۶	Aa	۲۳/۹۵ + ۲/۹۳	Aa	۲۱/۷۴ + ۲/۳۲	Aa	۲۱/۶۶ + ۱/۸۱	Aa
رطوبت خاک (درصد)	۱۰ - ۲۰	۲۹/۱۲ ± ۵/۶۸	Aa	۲۶/۶۳ + ۳/۶۶	Aa	۲۴/۷۲ + ۲/۱۶	Aa	۲۴/۸۵ + ۲/۴۶	Aa
	۲۰ - ۳۰	۲۹/۷۷ ± ۵/۰۲	Aa	۲۷/۶۴ + ۲/۳۹	Aa	۲۵/۰۳ + ۳/۶۳	Aa	۲۴/۹۵ + ۱/۸۳	Aa
	میانگین	۲۸/۵۸ ± ۲/۷۲	A	۲۶/۰۷ + ۱/۷۲	A	۲۳/۸۳ + ۱/۵۸	A	۲۳/۸۳ + ۱/۱۸	A
	۰ - ۱۰	۲۲/۳۷ ± ۰/۷۳	Ba	۳۲/۱۱ + ۱/۷۳	Aa	۳۲/۸۱ + ۱/۵۰	Aa	۳۴/۶۰ + ۱/۳۳	Aa
دمای خاک (درجه سانتیگراد)	۱۰ - ۲۰	۱۹/۲۰ ± ۰/۲۰	Bb	۲۷/۳۶ + ۲/۰۱	Ab	۲۷/۶۷ + ۱/۶۱	Ab	۲۹/۲۱ + ۱/۶۸	Ab
	۲۰ - ۳۰	۱۷/۸۷ ± ۱/۳۴	Bb	۲۳/۷۳ + ۰/۵۲	Ab	۲۴/۹۲ + ۰/۶۶	Ab	۲۵/۴۴ + ۱/۴۰	Ab
	میانگین	۱۹/۸۲ ± ۰/۵۹	B	۲۷/۷۳ + ۱/۰۵	A	۲۸/۴۷ + ۰/۹۲	A	۲۹/۷۵ + ۱/۰۴	A

حروف بزرگ در هر سطر نشان دهنده تفاوت معنی دار ($p < 0.05$) بین انواع کاربری زمین است.

حروف کوچک در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی دار ($p < 0.05$) بین اعماق خاک است.

تأثیر تغییر کاربری بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

در مقایسه با رویشگاه شاهد (درختچه‌زار)، تغییر پوشش گیاهی موجب کاهش اکثر ویژگی‌های شیمیایی خاک شد. بیشترین کاهش کربن آلی در جوزار مشاهده شد، به طوری که مقدار آن نسبت به شاهد ۱/۳۵ واحد درصد کاهش یافت. همچنین، ذخیره کربن خاک در گراس‌لند، گندم‌زار و جوزار به ترتیب ۴/۵۶، ۶/۴۰ و ۱۱/۶۶ مگاگرم بر هکتار کاهش نشان داد. کاهش شدید عناصر غذایی نیز مشاهده شد. به طوری که مقدار فسفر، پتاسیم و کلسیم در جوزار نسبت به درختچه‌زار به ترتیب ۱۹/۴۸، ۱۳۹/۱۱ و ۱۲۳/۰۶ میلی گرم بر کیلوگرم کاهش یافت. در مقابل، نسبت C/N در جوزار با افزایش ۶/۳۰ واحدی نسبت به شاهد همراه بود (جدول ۲).

جدول ۳. ویژگی‌های شیمیایی خاک (میانگین ± اشتباه معیار) بر اساس نوع کاربری زمین

ویژگی‌های خاک	عمق (سانتی متر)	درختچه‌زار	گراس‌لند با سابقه درختچه‌زار	گندم‌زار با سابقه درختچه‌زار	جوزار با سابقه درختچه‌زار
واکنش خاک pH	۰ - ۱۰	۷/۰۹ + ۰/۱۰	Aa	۶/۳۹ + ۰/۱۷	Ba
	۱۰ - ۲۰	۷/۰۹ + ۰/۰۸	Aa	۶/۵۷ + ۰/۱۹	Ba
	۲۰ - ۳۰	۷/۱۱ + ۰/۱۸	Aa	۶/۸۲ + ۰/۲۴	ABa
	میانگین	۷/۱۰ + ۰/۰۷	A	۶/۶۰ + ۰/۱۲	B
	۰ - ۱۰	۰/۳۷ + ۰/۰۱	Aa	۰/۲۷ + ۰/۰۲	Ba
هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)	۱۰ - ۲۰	۰/۳۸ + ۰/۰۱	Aa	۰/۳۰ + ۰/۰۲	Ba
	۲۰ - ۳۰	۰/۴۰ + ۰/۰۴	Aa	۰/۳۴ + ۰/۰۴	ABa
	میانگین	۰/۳۸ + ۰/۰۱	A	۰/۳۰ + ۰/۰۱	B
	۰ - ۱۰	۴/۱۱ + ۰/۲۰	Aa	۲/۹۱ + ۰/۱۷	Ba
	۱۰ - ۲۰	۲/۶۵ + ۰/۱۸	Ab	۲/۱۲ + ۰/۱۹	Bb
کربن (درصد)	۲۰ - ۳۰	۲/۵۶ + ۰/۳۶	Ab	۱/۹۳ + ۰/۱۹	ABb
	میانگین	۳/۱۱ + ۰/۱۹	A	۲/۳۲ + ۰/۱۲	B
	۰ - ۱۰	۴۴/۴۹ + ۲/۲۷	Aa	۳۸/۶۱ + ۲/۳۳	ABa
	۱۰ - ۲۰	۲۶/۹۲ + ۳/۵۳	Ba	۳۵/۴۳ + ۲/۹۹	Ba
	۲۰ - ۳۰	۲۶/۹۲ + ۳/۵۳	Ba	۳۵/۴۳ + ۲/۹۹	Ba

نیترژن کل (درصد)	۱۰ - ۲۰	۳۳ + ۲/۸۱	Ab	۲۹/۶۲ + ۲/۷۲	ABb	۲۷/۳۵ + ۲/۰۴	ABb	۲۴/۷۰ + ۲/۴۲	Ba
	۲۰ - ۳۰	۳۱/۳۴ + ۳/۸۱	Ab	۲۶/۹۳ + ۲/۵۴	Ab	۲۶/۸۸ + ۲/۱۴	Ab	۲۲/۲۳ + ۳/۷۳	Aa
	میانگین	۳۶/۲۸ + ۱/۹۶	A	۳۱/۷۲ + ۱/۶۵	AB	۲۹/۸۸ + ۱/۵۱	B	۲۴/۶۲ + ۱/۸۶	C
	۰ - ۱۰	۰/۴۱ + ۰/۰۳	Aa	۰/۲۶ + ۰/۰۲	Ba	۰/۲۱ + ۰/۰۱	Ba	۰/۲۰ + ۰/۰۱	Ba
	۱۰ - ۲۰	۰/۲۹ + ۰/۰۳	Ab	۰/۱۹ + ۰/۰۱	Bb	۰/۱۶ + ۰/۰۱	Bb	۰/۱۳ + ۰/۰۱	Bb
ترسیب نیترژن (مگاگرم بر هکتار)	۲۰ - ۳۰	۰/۲۸ + ۰/۰۲	Ab	۰/۱۸ + ۰/۰۱	Bb	۰/۱۵ + ۰/۰۰۶	BCb	۰/۱۱ + ۰/۰۲	Cb
	میانگین	۰/۳۳ + ۰/۰۲	A	۰/۲۱ + ۰/۰۱	B	۰/۱۷ + ۰/۰۰۷	BC	۰/۱۴ + ۰/۰۱	C
	۰ - ۱۰	۴/۴۹ + ۰/۴۲	Aa	۳/۵۵ + ۰/۲۷	Ba	۲/۹۷ + ۰/۱۹	Ba	۲/۷۳ + ۰/۲۹	Ba
	۱۰ - ۲۰	۳/۶۵ + ۰/۵۱	Aa	۲/۶۶ + ۰/۱۸	Bb	۲/۴۲ + ۰/۱۸	Bb	۱/۸۹ + ۰/۲۴	Bb
	۲۰ - ۳۰	۳/۵۳ + ۰/۳۲	Aa	۲/۶۰ + ۰/۱۹	Bb	۲/۳۰ + ۰/۱۱	BCb	۱/۷۲ + ۰/۳۱	Cb
نسبت کربن به نیترژن	میانگین	۳/۸۹ + ۰/۲۵	A	۲/۹۴ + ۰/۱۴	B	۲/۵۶ + ۰/۱۰	BC	۲/۱۱ + ۰/۱۲	C
	۰ - ۱۰	۱۰/۹۳ + ۱/۱۷	Aa	۱۱/۴۹ + ۱/۰۱	Aa	۱۲/۶۸ + ۱/۴۹	Aa	۱۱/۶۳ + ۲/۲۵	Aa
	۱۰ - ۲۰	۱۰/۷۵ + ۱/۵۶	Aa	۱۱/۴۲ + ۱/۰۹	Aa	۱۱/۸۶ + ۱/۱۹	Aa	۲۰/۴۱ + ۵/۹۲	Aa
	۲۰ - ۳۰	۹/۴۳ + ۱/۱۷	Bb	۱۰/۸۵ + ۱/۲۷	Ba	۱۱/۹۷ + ۱/۱۴	Ba	۱۱/۹۷ + ۳/۲۵	Aa
	میانگین	۱۰/۳۷ + ۰/۷۴	B	۱۱/۲۵ + ۰/۶۳	B	۱۲/۱۷ + ۰/۷۲	B	۱۶/۶۲ + ۲/۳۹	A
فسفر (میلی گرم بر کیلوگرم)	۰ - ۱۰	۳۶/۹۳ + ۱/۲۸	Aa	۱۸/۴۰ + ۱/۲۶	Ba	۱۴/۵۸ + ۰/۹۸	Ca	۱۲/۸۷ + ۱/۰۳	Ca
	۱۰ - ۲۰	۲۹/۸۵ + ۲/۴۵	Ab	۱۵/۸۸ + ۱/۳۶	Bab	۱۲/۶۱ + ۰/۸۰	BCa	۱۱/۰۹ + ۰/۹۶	Ca
	۲۰ - ۳۰	۲۵/۵۲ + ۱/۹۳	Ab	۱۴/۷۴ + ۰/۹۱	Bb	۱۲/۴۵ + ۱/۰۳	BCa	۹/۹۱ + ۰/۹۲	Ca
	میانگین	۳۰/۷۷ + ۱/۳۵	A	۱۶/۲۴ + ۰/۷۲	B	۱۳/۲۱ + ۰/۵۵	C	۱۱/۲۹ + ۰/۵۸	C
	۰ - ۱۰	۳۸۳/۵۰ + ۱۶/۳۴	Aa	۱۹۴/۱۶ + ۱۵/۶۰	Ba	۱۷۵/۱۶ + ۱۳/۷۶	BCa	۱۴۴/۷۵ + ۱۳/۲۰	Ca
پتاسیم (میلی گرم بر کیلوگرم)	۱۰ - ۲۰	۱۷۸/۱۶ + ۲۲/۰۳	Ab	۱۰۵/۰۸ + ۴/۸۹	Bb	۱۰۱/۵۸ + ۹/۲۶	Bb	۸۲/۷۵ + ۸/۱۲	Bb
	۲۰ - ۳۰	۱۵۲/۵۸ + ۱۷/۲۹	Ab	۹۷/۶۶ + ۴/۲۸	Bb	۹۳/۳۳ + ۲/۶۳	Bb	۶۹/۴۱ + ۷/۶۵	Bb
	میانگین	۲۳۸/۰۸ + ۲۰/۳۸	A	۱۳۲/۲۰ + ۹/۶۱	B	۱۲۳/۲۶ + ۸/۲۶	B	۹۸/۹۷ + ۷/۸۸	B
	۰ - ۱۰	۲۹۷/۵۸ + ۲۶/۴۳	Aa	۱۵۴/۷۵ + ۱۳/۰۱	Ba	۱۲۰/۰۸ + ۸/۲۵	BCa	۹۵/۷۵ + ۶/۹۴	Ca
	۱۰ - ۲۰	۱۷۶/۲۵ + ۱۳/۵۳	Ab	۱۲۷/۴۱ + ۱۱/۴۵	Bab	۱۱۰/۱۶ + ۵/۵۷	Ba	۹۷/۸۳ + ۷/۱۶	Ba
کلسیم (میلی گرم بر کیلوگرم)	۲۰ - ۳۰	۱۷۸/۲۵ + ۱۷/۷۳	Ab	۱۱۷/۳۷ + ۳/۸۴	Bb	۱۰۸/۲۵ + ۶/۱۸	BCa	۸۹/۳۳ + ۱۰/۰۴	Ca
	میانگین	۲۱۷/۳۶ + ۱۳/۸۵	A	۱۳۳/۱۶ + ۶/۳۳	B	۱۱۲/۸۳ + ۳/۹۱	BC	۹۴/۳۰ + ۴/۶۲	C
	۰ - ۱۰	۲۴/۳۳ + ۲/۱۴	Aa	۱۲/۱۶ + ۱/۳۲	Ba	۱۲/۷۰ + ۱/۰۹	Ba	۹/۲۶ + ۰/۷۵	Ba
	۱۰ - ۲۰	۲۹/۰۸ + ۱/۲۲	Ab	۸/۷۸ + ۰/۴۳	Bb	۸/۴۳ + ۰/۴۶	Bb	۶/۹۲ + ۰/۷۴	Bb
	۲۰ - ۳۰	۹/۰۵ + ۰/۳۱	Ab	۶/۶۳ + ۰/۶۲	Bb	۶/۵۸ + ۰/۵۸	Bb	۵/۶۹ + ۰/۸۶	Bb
نیترات (میلی گرم بر کیلوگرم)	میانگین	۱۵/۸۵ + ۱/۵۳	A	۹/۱۹ + ۰/۶۲	B	۹/۲۴ + ۰/۶۰	B	۷/۲۹ + ۰/۵۰	B
	۰ - ۱۰	۱۸/۲۵ + ۰/۷۱	Aa	۱۱/۰۶ + ۰/۸۹	Ba	۹/۳۹ + ۰/۳۴	BCa	۸/۲۵ + ۰/۷۸	Ca
	۱۰ - ۲۰	۱۰/۴۰ + ۰/۳۶	Ab	۷/۱۱ + ۰/۷۸	Bb	۷/۳۶ + ۰/۸۷	Bb	۵/۷۷ + ۰/۷۲	Bb
	۲۰ - ۳۰	۸/۴۹ + ۰/۷۵	Ac	۵/۱۸ + ۰/۵۶	Bb	۴/۵۰ + ۰/۳۷	Bc	۵/۲۲ + ۰/۷۰	Bb
	میانگین	۱۲/۳۸ + ۰/۷۹	A	۷/۷۸ + ۰/۵۹	B	۷/۰۸ + ۰/۴۷	B	۶/۴۱ + ۰/۴۶	B
ماده آلی	۰ - ۱۰	۷/۰۹ + ۰/۳۵	Aa	۵/۰۱ + ۰/۳۰	Ba	۴/۴۱ + ۰/۳۵	BCa	۳/۴۶ + ۰/۴۷	Ca
	۱۰ - ۲۰	۴/۵۷ + ۰/۳۱	Ab	۳/۶۶ + ۰/۳۴	Bb	۳/۱۷ + ۰/۱۶	Bb	۳/۰۸ + ۰/۳۱	Ba
	۲۰ - ۳۰	۴/۴۱ + ۰/۶۲	Ab	۳/۳۳ + ۰/۳۳	ABb	۳/۱۶ + ۰/۲۴	ABb	۲/۵۷ + ۰/۴۳	Ba
	میانگین	۵/۳۶ + ۰/۳۲	A	۴ + ۰/۲۲	B	۳/۵۸ + ۰/۱۷	BC	۳/۰۴ + ۰/۲۳	C
	۰ - ۱۰	۴/۰۸ + ۰/۳۶	Aa	۱/۴۱ + ۰/۱۹	Ba	۰/۹۴ + ۰/۰۹	BCa	۰/۵۱ + ۰/۳۰	Ca
کربن آلی ذره‌ای (گرم بر کیلوگرم)	۱۰ - ۲۰	۳/۱۲ + ۰/۳۹	Aab	۰/۹۳ + ۰/۱۸	Bab	۰/۴۶ + ۰/۰۸	Bb	۰/۳۶ + ۰/۰۹	Ba
	۲۰ - ۳۰	۲/۳۴ + ۰/۳۳	Ab	۰/۶۴ + ۰/۱۵	Bb	۰/۳۷ + ۰/۰۵	Bb	۰/۲۴ + ۰/۰۵	Ba
	میانگین	۳/۱۸ + ۰/۲۳	A	۱ + ۰/۱۱	B	۰/۵۹ + ۰/۰۶	C	۰/۳۷ + ۰/۱۰	C
	۰ - ۱۰	۰/۶۷ + ۰/۰۶	Aa	۰/۲۱ + ۰/۰۲	Ba	۰/۱۷ + ۰/۰۱	Ba	۰/۱۴ + ۰/۰۱	Ba
	۱۰ - ۲۰	۰/۳۸ + ۰/۰۷	Ab	۰/۰۶ + ۰/۰۱	Bb	۰/۰۵ + ۰/۰۰۷	Bb	۰/۰۵ + ۰/۰۰۷	Bb
نیترژن آلی ذره‌ای (گرم بر کیلوگرم)	۲۰ - ۳۰	۰/۳۶ + ۰/۰۷	Ab	۰/۰۵ + ۰/۰۱	Bb	۰/۰۳ + ۰/۰۰۵	Bb	۰/۰۲ + ۰/۰۰۶	Bb
	میانگین	۰/۴۷ + ۰/۰۴	A	۰/۱۱ + ۰/۰۱	B	۰/۰۹ + ۰/۰۱	B	۰/۰۷ + ۰/۰۱	B
	۰ - ۱۰	۶/۷۲ + ۰/۷۹	Aa	۷/۲۶ + ۰/۹۸	Aa	۶/۶۰ + ۱/۲۸	Aa	۵/۹۳ + ۳/۵۰	Aa
	نسبت کربن به نیترژن آلی ذره‌ای								

۱۰ - ۲۰	۱۲/۳۶ + ۳/۴۹	ABa	۳۵/۷۵ + ۱۶	Aa	۹/۵۲ + ۲/۰۱	Ba	۸/۶۲ + ۲/۵۱	Ba
۲۰ - ۳۰	۱۱/۲۶ + ۲/۹۷	Aa	۲۰/۹۵ + ۴/۳۶	Aa	۱۰/۸۱ + ۱/۵۰	Aa	۱۲/۶۲ + ۴/۲۴	Aa
میانگین	۱۰/۱۱ + ۱/۵۶	B	۲۱/۳۲ + ۵/۷۲	A	۸/۹۸ + ۰/۹۶	B	۹/۰۶ + ۲/۰۱	B
۰ - ۱۰	۷۶/۰۱ + ۴/۸۲	Aa	۳۶/۵۱ + ۲/۲۱	Ba	۲۲/۱۸ + ۱/۴۴	Ca	۲۰/۰۵ + ۲/۰۷	Ca
۱۰ - ۲۰	۵۳/۹۸ + ۵/۹۷	Ab	۱۵/۰۲ + ۲/۳۲	Bb	۱۰/۶۰ + ۱/۴۸	Bb	۹/۵۸ + ۱/۱۹	Bb
۲۰ - ۳۰	۴۲/۲۱ + ۵/۵۶	Ab	۱۰/۸۵ + ۰/۵۳	Bb	۸/۲۴ + ۰/۳۷	Bb	۶/۰۳ + ۰/۹۰	Bb
میانگین	۵۷/۴۰ + ۳/۸۷	A	۲۰/۷۹ + ۲/۱۷	B	۱۳/۶۸ + ۱/۲۳	C	۱۱/۸۹ + ۱/۳۰	C
۰ - ۱۰	۴۲/۶۷ + ۸/۳۶	Aa	۱۴/۵۹ + ۲/۱۹	Ba	۱۱/۹۴ + ۱/۳۷	Ba	۸/۲۰ + ۰/۷۸	Ba
۱۰ - ۲۰	۲۶/۴۵ + ۲/۷۳	Ab	۸/۸۵ + ۰/۴۶	Bb	۷/۷۸ + ۰/۵۳	Bb	۵/۵۹ + ۰/۶۷	Bb
۲۰ - ۳۰	۱۹/۱۷ + ۱/۲۴	Ab	۷/۳۹ + ۰/۶۲	Bb	۶/۷۱ + ۰/۵۹	BCb	۴/۷۸ + ۰/۵۷	Cb
میانگین	۲۹/۴۳ + ۳/۳۲	A	۱۰/۲۸ + ۰/۹۱	B	۸/۸۱ + ۰/۶۴	B	۶/۱۹ + ۰/۶۴	B
۰ - ۱۰	۲/۵۷ + ۰/۴۴	Aa	۲/۸۱ + ۰/۲۶	Aa	۲/۱۸ + ۰/۳۳	Aa	۲/۷۵ + ۰/۴۲	Aa
۱۰ - ۲۰	۲/۳۴ + ۰/۳۷	Aa	۱/۸۲ + ۰/۳۴	Ab	۱/۴۱ + ۰/۱۸	Ab	۲/۰۵ + ۰/۳۵	Aab
۲۰ - ۳۰	۲/۴۰ + ۰/۳۸	Aa	۱/۶۵ + ۰/۲۰	ABb	۱/۳۹ + ۰/۱۸	Bb	۱/۵۰ + ۰/۲۶	Bb
میانگین	۲/۴۴ + ۰/۲۲	A	۲/۰۹ + ۰/۱۷	AB	۱/۶۶ + ۰/۱۵	B	۲/۱۰ + ۰/۲۱	AB

حروف بزرگ در هر سطر نشان دهنده تفاوت معنی دار ($p < 0.05$) بین انواع کاربری زمین است.

حروف کوچک در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی دار ($p < 0.05$) بین اعماق خاک است.

تأثیر تغییر کاربری بر ویژگی‌های زیستی خاک

بیشترین مقادیر فراوانی و زیتوده تمامی گروه‌های اکولوژیکی کرم‌های خاکی در رویشگاه درختچه‌زار مشاهده شد و با تبدیل این رویشگاه به علفزار، گندم‌زار و جوزار به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. این کاهش در گروه‌های اپی‌ژئیک و آنسئیک شدیدتر بود. به‌طوریکه فراوانی این گروه‌ها در لایه‌های زیرین خاک‌های اراضی زراعی به‌صفر رسید. در مقابل، کرم‌های اندوژئیک در تمامی اعماق حضور داشتند و بیشترین مقادیر آن‌ها در عمق ۲۰-۳۰ سانتی‌متری مشاهده شد. بیشترین فراوانی نماتدها، پروتوزوئر، باکتری‌ها و قارچ‌ها در درختچه‌زار و کمترین مقادیر در جوزار مشاهده شد. به‌طور متوسط، تراکم این موجودات در درختچه‌زار به‌ترتیب حدود ۲ تا ۳، ۳ تا ۴ و ۴ تا ۵ برابر بیشتر از علفزار، گندم‌زار و جوزار بود. فعالیت آنزیم‌های خاک نیز کاهش چشمگیری نشان داد، به‌طوری‌که فعالیت آریل سولفاتاز در جوزار نسبت به شاهد ۵۰/۱۱۸ واحد کاهش یافت. در مقایسه با درختچه‌زار، تنفس پایه خاک در گراس‌لند، گندم‌زار و جوزار به‌ترتیب ۴۳/۸، ۵۹/۴ و ۵۹/۴ درصد کاهش یافت، در حالی که تنفس میکروبی برانگیخته به‌ترتیب ۴۴/۵، ۵۹/۹ و ۶۱/۸ درصد کاهش نشان داد. همچنین، کربن زی‌توده میکروبی در اثر تبدیل درختچه‌زار به گراس‌لند، گندم‌زار و جوزار به‌ترتیب ۶۱/۶، ۷۰/۵ و ۷۷/۶ درصد کاهش یافت. افزون بر این، مقادیر این شاخص‌ها با افزایش عمق خاک به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. در مقابل، شاخص‌های CO_2 و CAI در جوزار بیشترین مقادیر را داشتند و به‌طور میانگین حدود ۴ برابر بیشتر از درختچه‌زار بودند (جدول ۴).

جدول ۴. ویژگی‌های زیستی خاک (میانگین $\pm$ اشتباه معیار) بر اساس نوع کاربری زمین

ویژگی های خاک	عمق (سانتی متر)	درختچه زار	گراسلند با سابقه درختچه زار	گندم زار با سابقه درختچه زار	جوزار با سابقه درختچه زار	
فراوانی اپی ژئیک (n m ⁻²)	۰ - ۱۰	۱/۰۸ + ۰/۱۹	Aa ۰/۴۱ + ۰/۱۴	Ba ۰/۰۸ + ۰/۰۸	Ba ۰/۰۸ + ۰/۰۸	Ba
	۱۰ - ۲۰	۰/۰۰ + ۰/۰۰	b ۰/۰۰ + ۰/۰۰	b ۰/۰۰ + ۰/۰۰	a ۰/۰۰ + ۰/۰۰	a
	۲۰ - ۳۰	۰/۰۰ + ۰/۰۰	b ۰/۰۰ + ۰/۰۰	b ۰/۰۰ + ۰/۰۰	a ۰/۰۰ + ۰/۰۰	a
	میانگین	۰/۳۶ + ۰/۱۰	A ۰/۱۳ + ۰/۰۵	B ۰/۰۲ + ۰/۰۲	B ۰/۰۲ + ۰/۰۲	B
زی توده اپی ژئیک (mg m ⁻²)	۰ - ۱۰	۱۳/۶۸ + ۲/۲۴	Aa ۳/۶۹ + ۱/۳۲	Ba ۱/۰۶ + ۱/۰۶	Ba ۰/۷۹ + ۰/۷۹	Ba
	۱۰ - ۲۰	۰/۰۰ + ۰/۰۰	b ۰/۰۰ + ۰/۰۰	b ۰/۰۰ + ۰/۰۰	a ۰/۰۰ + ۰/۰۰	a
	۲۰ - ۳۰	۰/۰۰ + ۰/۰۰	b ۰/۰۰ + ۰/۰۰	b ۰/۰۰ + ۰/۰۰	a ۰/۰۰ + ۰/۰۰	a
	میانگین	۴/۵۶ + ۱/۳۱	A ۱/۲۳ + ۰/۵۲	B ۰/۳۵ + ۰/۳۵	B ۰/۲۶ + ۰/۲۶	B
فراوانی آنسئیک (n m ⁻²)	۰ - ۱۰	۰/۸۳ + ۰/۲۰	Aab ۰/۱۶ + ۰/۱۱	Ba ۰/۱۶ + ۰/۱۱	Bab ۰/۱۶ + ۰/۱۱	Ba
	۱۰ - ۲۰	۱/۵۸ + ۰/۵۱	Aa ۰/۴۱ + ۰/۲۲	Ba ۰/۳۳ + ۰/۱۴	Ba ۰/۲۵ + ۰/۱۳	Ba

	۲۰ - ۳۰	۰/۳۳ + ۰/۱۴	Ab	۰/۱۶ + ۰/۱۱	ABa	۰/۰۰ + ۰/۰۰	Bb	۰/۰۰ + ۰/۰۰	Ba
	میانگین	۰/۹۱ + ۰/۲۰	A	۰/۲۵ + ۰/۰۹	B	۰/۱۶ + ۰/۰۶	B	۰/۱۳ + ۰/۰۵	B
	۰ - ۱۰	۷/۳۴ + ۲/۰۶	Aab	۰/۹۱ + ۰/۶۷	Ba	۰/۵۰ + ۰/۳۵	Bb	۰/۳۸ + ۰/۲۶	Ba
زی توده آنسئیک (mg m ⁻²)	۱۰ - ۲۰	۱۳/۶۰ + ۳/۷۳	Aa	۴/۳۱ + ۲/۳۹	Ba	۴/۲۱ + ۱/۹۳	Ba	۱/۰۴ + ۰/۵۵	Ba
	۲۰ - ۳۰	۵/۱۰ + ۲/۲۸	Ab	۱/۷۲ + ۱/۲۰	ABa	۰/۰۰ + ۰/۰۰	Bb	۰/۰۰ + ۰/۰۰	Ba
	میانگین	۸/۶۸ + ۱/۶۸	A	۲/۳۱ + ۰/۹۲	B	۱/۵۷ + ۰/۷۱	B	۰/۴۷ + ۰/۲۱	B
	۰ - ۱۰	۰/۵۰ + ۰/۲۳	Ac	۰/۰۸ + ۰/۰۸	Ab	۰/۱۶ + ۰/۱۱	Aa	۰/۱۶ + ۰/۱۱	Aa
فراوانی اندوژئیک (n m ⁻²)	۱۰ - ۲۰	۲/۴۱ + ۰/۴۸	Ab	۰/۵۸ + ۰/۲۲	Bab	۰/۷۵ + ۰/۲۵	Ba	۰/۴۱ + ۰/۱۴	Ba
	۲۰ - ۳۰	۳/۸۳ + ۰/۲۹	Aa	۱/۵۰ + ۰/۵۱	Ba	۰/۹۱ + ۰/۳۷	Ba	۰/۵۸ + ۰/۲۵	Ba
	میانگین	۲/۲۵ + ۰/۳۰	A	۰/۷۲ + ۰/۲۰	B	۰/۶۱ + ۰/۱۶	B	۰/۳۸ + ۰/۱۰	B
فراوانی کنه خاکزی (n m ⁻²)	۰ - ۱۰	۷۹۸۷۶/۰۸ + ۴۸۳۵/۳۸	Aa	۲۸۸۸۷/۱۶ + ۲۸۸۳/۴۹	Ba	۱۷۳۱۲/۵ + ۵۷۸/۶۲	Ca	۱۳۴۴/۶۶ + ۱۷۲۶/۱۵	Ca
	۱۰ - ۲۰	۳۴۲۳۵/۰۸ + ۳۵۰۳/۲۲	Ab	۱۴۷۹۰/۷۵ + ۱۵۸۸/۱۶	Bb	۱۲۳۰۳/۹۱ + ۳۶۲/۸۲	Bb	۱۱۱۸۹ + ۲۱۱۲/۴۹	Ba
	۲۰ - ۳۰	۱۱۸۳۵/۲۵ + ۹۱۴/۶۲	Ac	۸۰۹۴/۸۳ + ۸۴۴/۱۴	Bc	۵۸۰۲/۴۱ + ۱۲۹۰/۱۷	ABc	۵۵۵۶/۸۳ + ۳۶۱۴/۶۱	Aa
	میانگین	۴۱۹۸۲/۱۳ + ۵۱۶۹/۶۸	A	۱۷۲۵۷/۵۸ + ۱۸۳۱/۸۱	B	۱۱۸۰۶/۲۷ + ۹۲۶/۲۹	B	۱۰۰۵۳/۵۰ + ۱۵۶۸/۷۱	B
فراوانی پادمان خاکزی (n m ⁻²)	۰ - ۱۰	۵۳۱۴۰/۹۱ + ۳۱۳۲/۸۸	Aa	۲۶۷۹۹/۴۱ + ۳۰۰۹/۶۹	Ba	۲۰۲۵۸/۹۱ + ۱۲۱۶/۹۲	BCa	۱۲۵۶۱/۶۶ + ۲۵۱۶/۳۲	Ca
	۱۰ - ۲۰	۳۰۸۴۶/۵۰ + ۲۷۶۳/۵۰	Ab	۱۲۹۵۴/۱۶ + ۱۳۶۶/۵۰	Bb	۱۰۶۸۴/۹۱ + ۴۶۸/۲۹	Bb	۲۱۵۴/۶۶ + ۲۳۴۹/۱۰	Bb
	۲۰ - ۳۰	۴۴۹۶/۴۱ + ۸۷۱/۸۶	Ac	۲۱۰۷/۹۱ + ۵۵۶/۰۶	Bc	۱۸۸۶ + ۴۶۰/۷۴	Bc	۱۷۳۷/۵۸ + ۸۴۳/۱۵	Bb
	میانگین	۲۹۴۹۴/۶۱ + ۳۶۳۳/۴۶	A	۱۳۹۵۳/۸۳ + ۲۰۲۳/۴۷	B	۱۰۹۴۳/۲۷ + ۱۳۴۴/۹۰	B	۷۵۲۰/۶۳ + ۱۴۰۸/۴۰	B
	۰ - ۱۰	۵۸۸ + ۴۹/۴۰	Aa	۲۰۹/۴۱ + ۲۹/۱۰	Ba	۱۶۸/۳۱ + ۲۱/۸۶	BCa	۱۰۹/۷۵ + ۱۴/۹۷	Ca
نماد کل خاکزی (in 100 gr soil)	۱۰ - ۲۰	۳۲۶/۹۱ + ۴۶/۳۵	Ab	۱۰۷/۵۰ + ۹/۹۳	Bb	۱۰۲ + ۱۰/۳۵	Bb	۷۳/۳۳ + ۱۴/۰۵	Bb
	۲۰ - ۳۰	۱۲۷/۷۵ + ۱۷/۴۱	Ac	۵۹/۰۸ + ۳/۸۹	Bb	۴۳/۶۶ + ۳/۷۰	Bc	۴۲/۳۳ + ۷/۰۶	Bb
	میانگین	۳۴۷/۵۵ + ۳۹/۰۸	A	۱۲۵/۲۳ + ۱۴/۵۸	B	۱۰۴/۶۹ + ۱۱/۷۰	B	۷۵/۱۳ + ۸/۳۳	B
	۰ - ۱۰	۵۷۹/۱۶ + ۷۴/۱۵	Aa	۲۹۶/۵۰ + ۲۳/۴۰	Ba	۲۰۸/۷۵ + ۲۳/۰۶	BCa	۱۴۱/۲۵ + ۲۵/۳۹	Ca
فراوانی پروتوزوئر خاکزی (in 100 gr soil)	۱۰ - ۲۰	۳۸۶/۱۶ + ۵۱/۵۸	Ab	۱۶۶/۶۶ + ۲۷/۲۷	Bb	۱۲۵/۵۰ + ۱۹/۵۵	Bb	۹۹/۵۰ + ۰/۲۲/۰۱	Bab
	۲۰ - ۳۰	۱۱۱/۸۳ + ۷/۷۱	Ac	۸۴/۰۸ + ۹/۸۸	Bc	۶۰/۰۸ + ۱۴/۶۶	Bc	۵۷/۶۶ + ۱۷/۳۶	Bb
	میانگین	۳۵۹/۰۵ + ۴۳/۷۳	A	۱۸۲/۴۱ + ۲۰/۵۹	B	۱۳۱/۴۴ + ۱۴/۹۷	BC	۹۹/۴۷ + ۱۳/۵۳	C
	۰ - ۱۰	۰/۵۲ + ۰/۰۳	Aa	۰/۳۰ + ۰/۰۳	Ba	۰/۲۲ + ۰/۰۲	Ba	۰/۲۱ + ۰/۰۳	Ba
تنفس پایه (mg co2 g-1 day-1)	۱۰ - ۲۰	۰/۲۵ + ۰/۰۴	Ab	۰/۱۲ + ۰/۰۱	Bb	۰/۱۱ + ۰/۰۱	Bb	۰/۱۱ + ۰/۰۳	Bb
	۲۰ - ۳۰	۰/۲۱ + ۰/۰۲	Ab	۰/۱۱ + ۰/۰۱	Bb	۰/۰۸ + ۰/۰۱	BCb	۰/۰۵ + ۰/۰۱	Cb
	میانگین	۰/۳۲ + ۰/۰۳	A	۰/۱۸ + ۰/۰۲	B	۰/۱۳ + ۰/۰۱	B	۰/۱۳ + ۰/۰۱	B
	۰ - ۱۰	۱/۴۶ + ۰/۰۸	Aa	۱/۰۲ + ۰/۰۹	Ba	۰/۸۵ + ۰/۰۸	Ba	۰/۸۴ + ۰/۱۶	Ba
تنفس میکروبی برانگیخته (mg co2 g-1 day-1)	۱۰ - ۲۰	۰/۹۹ + ۰/۱۵	Ab	۰/۴۸ + ۰/۱۰	Bb	۰/۳۱ + ۰/۰۷	Bb	۰/۱۸ + ۰/۰۹	Bb
	۲۰ - ۳۰	۰/۸۴ + ۰/۱۵	Ab	۰/۳۱ + ۰/۰۳	Bb	۰/۱۶ + ۰/۰۰۹	Bb	۰/۲۲ + ۰/۰۷	Bb
	میانگین	۱/۱۰ + ۰/۰۸	A	۰/۶۱ + ۰/۰۶	B	۰/۴۴ + ۰/۰۶	B	۰/۴۲ + ۰/۰۸	B
	۰ - ۱۰	۵۴۰ + ۴۰/۴۸	Aa	۲۱۶/۵۰ + ۳۷/۰۳	Ba	۱۸۹/۴۱ + ۳۷/۰۴	Ba	۱۶۶/۹۲ + ۱۵/۳۶	Ba
کربن زی توده میکروبی (mg kg-1)	۱۰ - ۲۰	۳۵۹/۸۳ + ۵۹/۴۶	Ab	۱۲۰/۰۸ + ۱۹/۸۸	Bb	۸۶/۵۰ + ۶/۷۸	Bb	۵۷/۶۳ + ۱۰/۵۶	Bb
	۲۰ - ۳۰	۲۸۰/۷۵ + ۳۶/۵۰	Ab	۱۱۷/۸۳ + ۹/۹۲	Bb	۷۲/۶۶ + ۴/۴۱	BCb	۴۱/۴۳ + ۶/۵۶	Cb
	میانگین	۳۹۳/۵۲ + ۳۱/۹۰	A	۱۵۱/۴۷ + ۱۳/۷۳	B	۱۱۶/۱۹ + ۱۲/۶۸	BC	۸۸/۶۶ + ۱۱/۳۸	C
	۰ - ۱۰	۲/۰۹ + ۰/۱۳	Aa	۰/۹۶ + ۰/۱۸	Ba	۱/۰۹ + ۰/۲۰	Ba	۱/۱۹ + ۰/۱۶	Ba
نسبت زی توده میکروبی فسفر به فسفر کل	۱۰ - ۲۰	۱/۷۵ + ۰/۳۱	Aab	۰/۹۷ + ۰/۱۵	Ba	۰/۸۶ + ۰/۰۸	Bab	۰/۷۶ + ۰/۱۰	Bb
	۲۰ - ۳۰	۱/۳۱ + ۰/۲۶	Ab	۰/۸۹ + ۰/۰۸	Ba	۰/۶۸ + ۰/۰۵	Bb	۰/۷۶ + ۰/۱۰	Bb
	میانگین	۱/۷۲ + ۰/۱۵	A	۰/۹۴ + ۰/۰۸	B	۰/۸۸ + ۰/۰۸	B	۰/۹۰ + ۰/۰۷	B
	۰ - ۱۰	۹/۷۳ + ۰/۸۳	Aa	۱۱/۲۱ + ۱/۶۱	Aa	۱۰/۹۶ + ۱/۰۱	Aa	۱۱/۲۲ + ۱/۰۹	Aa
نسبت زی توده میکروبی کربن به زی توده میکروبی	۱۰ - ۲۰	۸/۳۴ + ۱/۲۳	Aa	۹/۳۸ + ۲/۲۰	Aa	۱۰/۱۲ + ۰/۹۰	Aa	۱۱/۰۵ + ۲/۸۰	Aa
	۲۰ - ۳۰	۸/۱۸ + ۱/۴۲	Aa	۹/۸۲ + ۱/۲۹	Aa	۹/۳۵ + ۰/۷۱	Aa	۸/۳۶ + ۱/۱۸	Aa
	میانگین	۸/۷۵ + ۰/۶۷	A	۱۰/۱۳ + ۰/۹۸	A	۱۰/۱۴ + ۰/۵۰	A	۱۰/۲۱ + ۱/۰۷	A
نسبت زی توده میکروبی کربن به زی توده میکروبی فسفر	۰ - ۱۰	۷/۴۵ + ۰/۸۴	Ba	۱۵/۰۹ + ۲/۲۰	Aa	۱۴/۴۶ + ۱/۸۲	Aa	۱۳/۸۷ + ۲/۲۸	Aa
	۱۰ - ۲۰	۹/۴۵ + ۲/۴۹	Aa	۱۰/۸۱ + ۲/۴۵	Aa	۹/۶۶ + ۲/۰۷	Aa	۷/۲۸ + ۱/۰۴	Ab

	۲۰ - ۳۰	۱۱/۸۴ + ۲/۴۶	Aa	۹/۷۵ + ۰/۹۳	ABa	۹/۶۰ + ۱/۰۷	ABa	۶/۸۰ + ۱/۰۲	Bb
	میانگین	۹/۵۸ + ۱/۲۰	A	۱۱/۸۸ + ۱/۱۷	A	۱۱/۲۴ + ۱/۰۳	A	۹/۳۲ + ۱/۰۳	A
	۰ - ۱۰	۰/۷۹ + ۰/۰۷	Bb	۱/۵۶ + ۰/۳۷	Aa	۱/۵۰ + ۰/۳۷	ABa	۱/۳۳ + ۰/۲۶	ABa
نسبت زی توده میکروبی نیتروژن	۱۰ - ۲۰	۱/۱۳ + ۰/۱۹	Aab	۱/۳۲ + ۰/۲۵	Aa	۰/۹۲ + ۰/۱۲	Ab	۱/۲۶ + ۰/۳۹	Aa
به زی توده میکروبی فسفر	۲۰ - ۳۰	۱/۵۰ + ۰/۲۲	Aa	۱/۱۰ + ۰/۱۳	ABa	۱/۰۳ + ۰/۰۹	Bab	۰/۸۵ + ۰/۱۳	Ba
	میانگین	۱/۱۴ + ۰/۱۰	A	۱/۳۳ + ۰/۱۳	A	۱/۱۵ + ۰/۱۱	A	۱/۱۵ + ۰/۱۶	A
	۰ - ۱۰	۱/۰۴ + ۰/۱۴	Aa	۱/۶۱ + ۰/۲۱	Aa	۱/۵۳ + ۰/۳۴	Aa	۱/۶۲ + ۰/۴۸	Aa
ضریب متابولیسی	۱۰ - ۲۰	۰/۷۹ + ۰/۱۱	Ba	۱/۲۳ + ۰/۱۶	Bab	۱/۴۱ + ۰/۲۵	Ba	۴/۳۷ + ۱/۴۷	Aa
	۲۰ - ۳۰	۰/۸۹ + ۰/۱۲	Aa	۰/۹۷ + ۰/۱۵	ABb	۱/۲۶ + ۰/۲۲	Ba	۱/۹۷ + ۰/۵۸	Ba
	میانگین	۰/۹۱ + ۰/۰۷	B	۱/۲۷ + ۰/۱۰	B	۱/۴۰ + ۰/۱۳	B	۲/۶۵ + ۰/۵۷	A
	۰ - ۱۰	۱۳۳/۳۶ + ۱۰/۴۵	Aa	۷۶/۲۳ + ۹/۰۴	Ba	۷۹/۲۰ + ۱۲	Ba	۶۹/۱۵ + ۵/۵۹	Ba
سهم میکروبی	۱۰ - ۲۰	۱۳۸/۵۲ + ۲۲/۷۸	Aa	۶۲/۳۰ + ۱۰/۷۶	Ba	۴۸/۶۷ + ۴/۷۱	Bb	۳۹/۰۲ + ۸/۷۷	Bb
	۲۰ - ۳۰	۱۲۲/۲۰ + ۱۸/۰۳	Aa	۷۱/۴۰ + ۱۱/۱۴	Ba	۴۲/۷۱ + ۴/۵۷	Bb	۳۹/۲۳ + ۹/۸۸	Bb
	میانگین	۱۳۱/۳۶ + ۱۰/۰۶	A	۶۹/۹۸ + ۵/۸۸	B	۵۶/۸۶ + ۵/۱۸	B	۵۹/۰۸ + ۸/۱۵	B
	۰ - ۱۰	۰/۳۶ + ۰/۰۲	Aa	۰/۳۶ + ۰/۰۹	Aa	۰/۳۹ + ۰/۱۴	Aa	۰/۵۱ + ۰/۱۷	Ab
قابلیت دسترسی کربن	۱۰ - ۲۰	۰/۳۵ + ۰/۱۲	Aa	۰/۷۸ + ۰/۳۵	Aa	۰/۵۲ + ۰/۰۹	Aa	۳/۳۰ + ۱/۳۴	Ba
	۲۰ - ۳۰	۰/۴۰ + ۰/۰۹	Aa	۰/۳۸ + ۰/۰۷	Aa	۰/۵۱ + ۰/۰۷	Aa	۰/۵۹ + ۰/۲۰	Ab
	میانگین	۰/۳۷ + ۰/۰۵	B	۰/۵۱ + ۰/۱۲	B	۰/۴۸ + ۰/۰۶	B	۱/۴۷ + ۰/۴۹	A
	۰ - ۱۰	۲۸/۹۵ + ۳/۲۰	Aa	۱۶/۲۸ + ۱/۵۲	Ba	۱۲/۱۶ + ۰/۶۷	BCa	۸/۶۳ + ۰/۸۸	Ca
آنزیم آورده از	۱۰ - ۲۰	۲۰/۳۴ + ۲/۳۲	Ab	۱۰/۹۹ + ۰/۸۷	Bb	۸/۹۸ + ۰/۴۱	Bb	۷/۹۲ + ۰/۴۲	Ba
($\mu\text{g NH}_4^+-\text{N g}^{-1} 2 \text{ h}^{-1}$)	۲۰ - ۳۰	۱۳/۸۳ + ۱/۳۱	Ab	۷/۹۲ + ۰/۴۲	Bc	۶/۳۱ + ۰/۶۳	BCc	۵/۲۰ + ۰/۵۰	Cb
	میانگین	۲۱/۰۴ + ۱/۷۰	A	۱۱/۷۳ + ۰/۸۲	B	۹/۱۵ + ۰/۵۲	BC	۷/۲۵ + ۰/۴۳	C
	۰ - ۱۰	۵۲۳/۱۶ + ۸۰/۳۰	Aa	۲۱۸/۵۰ + ۲۲/۰۹	Ba	۲۱۸/۲۵ + ۲۴/۷۸	Ba	۱۳۴/۱۶ + ۱۴/۲۶	Ba
آنزیم اسید فسفاتاز	۱۰ - ۲۰	۳۹۱/۵۸ + ۵۰/۱۵	Aa	۱۲۱/۴۱ + ۱۵/۲۷	Bb	۱۱۴/۹۱ + ۱۰/۳۸	Bb	۹۸/۰۸ + ۱۰/۳۰	Bb
($\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	۲۰ - ۳۰	۲۲۰/۵۸ + ۲۸/۶۸	Ab	۸۷/۷۵ + ۶/۷۸	Bb	۶۹/۶۶ + ۵/۳۲	Bb	۵۴/۱۶ + ۴/۵۵	Bc
	میانگین	۳۷۸/۴۴ + ۳۸/۲۵	A	۱۴۲/۵۵ + ۱۷/۳۹	B	۱۳۴/۲۷ + ۱۳/۷۵	B	۹۵/۴۷ + ۸/۰۷	B
	۰ - ۱۰	۲۱۱/۵۸ + ۱۸/۰۴	Aa	۸۶/۱۶ + ۴/۹۹	Ba	۷۹/۳۳ + ۵/۱۱	Ba	۳۸/۹۱ + ۴/۷۳	Ca
آنزیم آریل سولفاتاز	۱۰ - ۲۰	۱۳۱/۱۶ + ۱۰/۳۶	Ab	۷۵/۸۳ + ۴/۴۱	Bab	۶۵/۴۱ + ۶/۳۶	Ba	۲۸/۷۵ + ۲/۶۲	Cb
($\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	۲۰ - ۳۰	۹۸/۵۰ + ۹/۶۳	Ab	۶۵/۸۳ + ۶/۰۴	Bb	۴۲/۴۱ + ۵/۶۰	Cb	۱۸/۰۸ + ۲/۴۹	Dc
	میانگین	۱۴۷/۰۸ + ۰/۹۳	A	۷۵/۹۴ + ۳/۲۳	B	۶۲/۳۸ + ۴/۱۱	B	۲۸/۵۸ + ۲/۴۰	C
	۰ - ۱۰	۲۰۸/۴۱ + ۲۴/۶۹	Aa	۱۱۹ + ۱۲/۶۰	Ba	۸۴/۹۱ + ۳/۱۸	BCa	۵۲ + ۶/۸۸	Ca
آنزیم اینورتاز	۱۰ - ۲۰	۱۲۵/۷۵ + ۱۵/۰۴	Ab	۷۶/۴۱ + ۲/۷۳	Bb	۶۸/۱۶ + ۴/۶۵	Bb	۳۸/۰۸ + ۶	Cab
($\mu\text{g Glucose g}^{-1} 3 \text{ h}^{-1}$)	۲۰ - ۳۰	۹۶/۹۱ + ۱۱/۶۷	Ab	۶۵/۴۱ + ۶/۷۱	Bb	۵۰/۳۳ + ۴/۶۳	Bc	۲۸ + ۴/۷۰	Cb
	میانگین	۱۴۷/۰۲ + ۱۲/۷۶	A	۸۶/۹۴ + ۶/۱۱	B	۶۷/۸۰ + ۳/۳۵	B	۳۹/۳۶ + ۳/۷۱	C

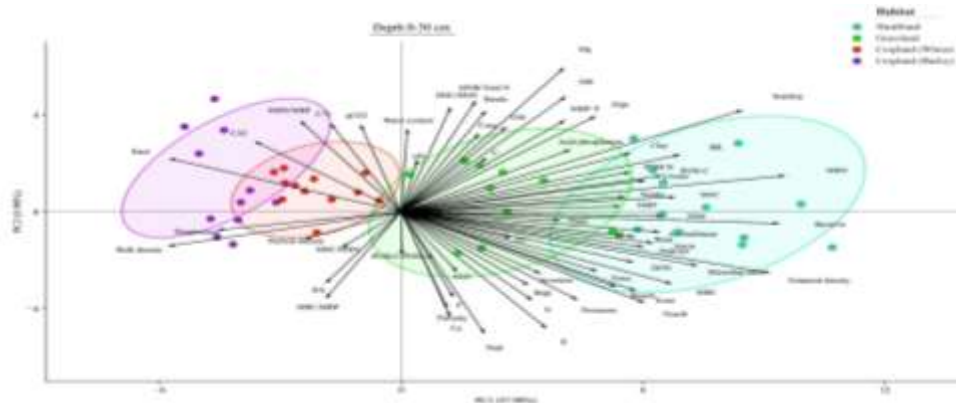
حروف بزرگ در هر سطر نشان دهنده تفاوت معنی دار ($p < 0.05$) بین انواع کاربری زمین است.

حروف کوچک در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی دار ($p < 0.05$) بین اعماق خاک است.

ارتباط بین تخریب پوشش گیاهی و ویژگی های خاک

پراکنش نمونه ها در فضای PCA تفاوت مشخصی بین رویشگاه ها نشان داد. درختچه زار در سمت مثبت محور اول و در ارتباط با ویژگی های حاصلخیزی و فعالیت زیستی خاک قرار گرفت، درحالی که گراس لند، گندم زار و جوزار در جهت مخالف این محور پراکنده شدند که بیانگر تغییر ویژگی های خاک در اثر تغییر پوشش گیاهی است. مؤلفه اول عمدتاً تحت تأثیر ویژگی های شیمیایی و زیستی خاک بود، درحالی که مؤلفه دوم بیشتر با ویژگی های فیزیکی مرتبط بود. الگوی پراکنش متغیرها نشان داد ویژگی های مرتبط با چرخه عناصر غذایی و فعالیت زیستی، ارتباط بیشتری با درختچه زار دارند، درحالی که تبدیل پوشش طبیعی به کاربری های زراعی، به ویژه جوزار، با کاهش هم زمان بسیاری از این شاخص ها همراه بود. فاصله بیشتر نمونه های جوزار از درختچه زار در فضای PCA نیز بیانگر بیشترین تغییر در مجموعه

ویژگی‌های خاک در این رویشگاه بود. به‌طور کلی، نتایج PCA نشان داد تغییر پوشش طبیعی به کاربری‌های انسانی، جهت‌گیری کلی ویژگی‌های خاک را تغییر داده و بیشترین اثر آن بر مؤلفه‌های مرتبط با فعالیت زیستی و چرخه عناصر غذایی مشاهده شد.



شکل ۲. ارتباط پوشش‌های گیاهی مورد مطالعه: درختچه‌زار، علفزار گندم‌زار و جوار با ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در آنالیز مؤلفه‌های اصلی

بحث

تخریب پوشش گیاهی طبیعی و تبدیل آن به علفزار و اراضی زراعی، با کاهش ورودی ماده آلی به خاک آغاز می‌شود و زنجیره‌ای از تغییرات را در ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک به دنبال دارد. اگرچه بافت خاک به‌طور معمول در شمار ویژگی‌های نسبتاً پایدار خاک طبقه‌بندی می‌شود (Wen-Jie et al., 2011)، با این حال، نتایج مطالعه Meyfroidt et al. (2013) بیانگر آن است که مؤلفه‌های بافت خاک (شامل رس، سیلت و شن) در مقیاس‌های زمانی طولانی‌مدت، تحت تأثیر فرآیندهای تکاملی خاک و همچنین توالی‌های پوشش گیاهی دچار تغییرات معنی‌داری می‌شوند موضوعی که با یافته‌های تحقیق حاضر نیز مطابقت دارد. به‌طوریکه مطابق با یافته‌های پژوهش حاضر تخریب پوشش گیاهی و تبدیل درختچه‌زار به جوار باعث شد درصد رس خاک تقریباً به نصف کاهش یابد و در مقابل، درصد شن نزدیک به دو برابر افزایش داشت. در گام نخست، کاهش ماده آلی و آشفته‌گی مکانیکی ناشی از خاک‌ورزی، به فروپاشی خاکدانه‌ها و افزایش جرم مخصوص ظاهری منجر می‌شود (Horn, 2021)، در مقابل، سیستم ریشه‌های متفاوت گونه‌های درختچه‌ای در رویشگاه درختچه‌زار، آرایش بهتر ذرات خاک و پایداری بالاتر خاکدانه‌ها را به همراه دارد. این تفاوت در ساختمان فیزیکی خاک، به‌نوبه‌ی خود بر ظرفیت نگهداری رطوبت و تنظیم دمای خاک نیز اثر می‌گذارد (Lombao et al., 2015). در گام بعدی، این تغییرات فیزیکی با افت عناصر غذایی و ذخایر کربن و نیتروژن همراه است. مقادیر بالاتر کربن و نیتروژن آلی محلول در رویشگاه درختچه‌زار نسبت به علفزار، گندم‌زار و جوار، بیانگر آن است که کاهش ورود بقایای گیاهی و برداشت مداوم زیست‌توده در کاربری‌های تخریب‌یافته، کسرهای فعال و قابل‌دسترس ماده آلی خاک را کاهش داده است (Sarto et al., 2020)، کاهشی که با توجه به حساسیت بالای این شاخص‌ها به تغییر کاربری اراضی (Dungait et al., 2012)، می‌تواند نشانه‌ی اختلال در چرخه عناصر غذایی باشد. کاهش بیشتر این شاخص‌ها در عمق‌های پایین‌تر خاک نیز با محدودیت انتقال ترکیبات آلی از سطح به لایه‌های زیرین قابل توجیه است (Hafner et al., 2005).

بیشتر بودن pH خاک در رویشگاه درختچه‌زار نسبت به سایر رویشگاه‌ها را می‌توان به تجمع و حفظ بیشتر کاتیون‌های بازی (به‌ویژه کلسیم، منیزیم و پتاسیم) در اثر بازگشت مداوم بقایای گیاهی، کاهش فرسایش و محدود شدن آبشویی این عناصر نسبت داد. در مقابل، تبدیل درختچه‌زار به اراضی زراعی موجب کاهش پوشش گیاهی، افزایش فرسایش و تشدید آبشویی کاتیون‌های بازی در لایه‌های سطحی خاک شده و در نتیجه کاهش pH خاک را به دنبال داشته است (Gemada, 2021). اختلاف مقادیر EC در رویشگاه‌ها احتمالاً ناشی از تفاوت ترکیب گونه‌ای پوشش گیاهی و ویژگی‌های شیمیایی بقایای تولیدی آن‌هاست که با تأثیر بر تجزیه و آزادسازی یون‌های محلول، هدایت الکتریکی خاک را متأثر می‌سازد (Rezaei et al., 2005). از آنجا که ماده آلی مهم‌ترین مخزن کربن خاک است، حضور گونه‌های چوبی در درختچه‌زار با تأمین مداوم بقایای هوایی و زیرزمینی موجب افزایش ورودی ماده آلی و تجمع بیشتر کربن آلی شده است (Montané

۱۹۸ et al., 2010)، در مقابل، تبدیل این رویشگاه به علفزار و اراضی زراعی با محدود کردن ورود مواد آلی، ذخایر کربن خاک را کاهش داده
 ۱۹۹ است. برخلاف کربن، تغییرات نیتروژن علاوه بر ورودی بقایای گیاهی به فرآیندهای معدنی شدن و فعالیت میکروبی نیز وابسته است.
 ۲۰۰ بنابراین مقادیر بالاتر نیتروژن در درختچه‌زار احتمالاً ناشی از زیست‌توده و ریزاقلیم مطلوب‌تر است، درحالی‌که تبدیل آن به اراضی زراعی با
 ۲۰۱ اختلال در چرخه نیتروژن، کاهش معنی‌دار این عنصر را در پی داشته است (Filipović et al., 2024). نسبت بالاتر C/N در جوزار نیز به
 ۲۰۲ حضور ترکیبات فنلی مقاوم به تجزیه در بقایای جو نسبت داده می‌شود، درحالی‌که گونه‌های *Berberis* و *Crataegus* در درختچه‌زار با تولید
 ۲۰۳ بقایای باکیفیت‌تر، نسبت C/N را کاهش می‌دهند (Kooch and Ghaderi, 2023). با توجه به اینکه فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم در
 ۲۰۴ دامنه pH ۶٫۵ تا ۷٫۵ بیشترین قابلیت دسترسی را دارند (Chi et al., 2016)، می‌توان نتیجه گرفت که تجمع بیشتر لاشبرگ و شرایط
 ۲۰۵ مناسب‌تر pH در درختچه‌زار، فراهمی عناصر غذایی و حاصلخیزی خاک را نسبت به سایر رویشگاه‌ها افزایش داده است. پوشش گیاهی از
 ۲۰۶ طریق تبدیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و تأمین بقایای آلی، یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ساختار و فراوانی جوامع زیستی
 ۲۰۷ خاک محسوب می‌شود. بر اساس گزارش Lagerlöf et al. (2002)، کرم‌های خاکی اپی‌ژئیک به دلیل زندگی در لایه سطحی خاک، حساسیت
 ۲۰۸ بیشتری نسبت به تغییرات محیطی دارند و کاهش پوشش گیاهی و ورودی بقایای آلی ناشی از تغییر کاربری اراضی می‌تواند فراوانی و
 ۲۰۹ زی‌توده این گروه را بیشتر تحت تأثیر قرار دهد. در مقابل، گروه‌های اندوژئیک و آن‌ستیک به دلیل استقرار در لایه‌های عمیق‌تر، کمتر متأثر
 ۲۱۰ می‌شوند (Lavelle, 1988). در رویشگاه درختچه‌زار، تاج‌پوشش متراکم با بهبود شرایط رطوبتی و حرارتی، محیط مناسب‌تری برای استقرار
 ۲۱۱ و افزایش فراوانی کرم‌های خاکی فراهم کرده است (Suthar, 2012).
 ۲۱۲ فعالیت میکروارگانیسم‌ها و آنزیم‌های خاک به دلیل نقش اساسی در چرخه عناصر غذایی و حساسیت بالا به تغییر پوشش گیاهی و کاربری
 ۲۱۳ اراضی، از مهم‌ترین شاخص‌های زیستی ارزیابی عملکرد خاک محسوب می‌شوند. با توجه به ارتباط تنگاتنگ فعالیت‌های آنزیمی و
 ۲۱۴ حاصلخیزی خاک (Wang et al., 2013)، عناصر غذایی بیشتر (کلسیم، منیزیم، پتاسیم و فسفر) در رویشگاه درختچه‌زار شرایط بهینه‌تری
 ۲۱۵ برای فعالیت آنزیم‌های خاک فراهم کرده است. جمعیت کنه و پادمان به‌شدت تحت تأثیر فرسایش، تخلخل و حاصلخیزی خاک قرار دارد
 ۲۱۶ (Chen et al., 2016)، به‌طوری‌که کاهش نیتروژن و افزایش نسبت C/N و کاهش عناصر غذایی (Salamon et al., 2004) محدودیت‌هایی
 ۲۱۷ برای حضور آن‌ها در علفزار و اراضی زراعی ایجاد کرده است. همچنین Erdmann et al. (2012) نشان دادند جوامع کنه و پادمان به‌شدت
 ۲۱۸ تحت تأثیر pH خاک هستند. در همین راستا، pH پایین‌تر خاک در گندم‌زار و جوزار از عوامل اصلی کاهش جمعیت این گروه بوده است.
 ۲۱۹ کاهش پوشش تاجی نیز با افزایش تابش مستقیم و دمای خاک و تغییر شرایط رطوبتی، فعالیت نماتدها و پروتوزوئرها را محدود کرده و
 ۲۲۰ کاهش جمعیت آن‌ها را در علفزار و اراضی زراعی در پی داشته است (Liu et al., 2019). کیفیت منابع غذایی از عوامل اصلی مؤثر بر
 ۲۲۱ فراوانی میکروارگانیسم‌های خاک است (Eslaminejad et al., 2020). از این‌رو افزایش جمعیت نماتدها و پروتوزوئرها در درختچه‌زار احتمالاً
 ۲۲۲ به فراهمی منابع غذایی بیشتر و کیفیت بالاتر لاشبرگ مرتبط است. همچنین بیشترین تراکم نماتدها در pH هفت یا بالاتر مشاهده می‌شود،
 ۲۲۳ درحالی‌که در pH پایین‌تر جمعیت آن‌ها کمتر است (Matute, 2013). بنابراین شرایط قلیایی‌تر خاک در درختچه‌زار در افزایش فراوانی این
 ۲۲۴ موجودات نقش داشته است. پوشش گیاهی از طریق تأمین بقایای گیاهی و بهبود شرایط تغذیه‌ای، نقش مهمی در افزایش فعالیت جوامع
 ۲۲۵ میکروبی دارد (Bayranvand et al., 2017). افزایش ماده آلی خاک نیز اثر مثبتی بر فعالیت قارچ‌ها دارد (Li et al., 2014) و وجود عناصری
 ۲۲۶ مانند کلسیم و منیزیم می‌تواند جمعیت آن‌ها را افزایش دهد (کهراریان و همکاران، ۱۳۹۶).
 ۲۲۷ رطوبت خاک از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده تنفس میکروبی است (Cook and Orchard, 2008). از این‌رو مقادیر بالاتر تنفس در
 ۲۲۸ درختچه‌زار و علفزار می‌تواند ناشی از رطوبت بیشتر این اکوسیستم‌ها باشد. عناصر غذایی خاک نیز در کنترل تغییرات تنفس خاک نقش
 ۲۲۹ دارند (Tardy et al., 2014)، به‌طوری‌که افزایش عناصر غذایی در درختچه‌زار با تحریک فعالیت میکروبی، تنفس خاک را افزایش داده است.
 ۲۳۰ همسو با پژوهش حاضر، مطالعات مختلف نشان داده‌اند مقادیر زی‌توده میکروبی کربن، نیتروژن و فسفر در کاربری‌های زراعی کمتر از
 ۲۳۱ رویشگاه‌های طبیعی است، که عمدتاً به کاهش لاشبرگ و ماده آلی خاک نسبت داده می‌شود (Brant et al., 2006). این کاهش، افت
 ۲۳۲ کیفیت کربن آلی و تغییر ترکیب جوامع میکروبی را نشان می‌دهد. شاخص qCO_2 به‌عنوان شاخص وضعیت اکوفیزیولوژیک میکروبی در
 ۲۳۳ شرایط تنش افزایش می‌یابد. حذف پوشش طبیعی و تبدیل آن به اراضی زراعی با برهم‌زدن پایداری خاک، تنش بر جوامع میکروبی و این
 ۲۳۴ شاخص را افزایش داده است (Ashraf et al., 2022). شاخص CAI نیز شاخص مهمی برای ارزیابی پاسخ میکروبی به تغییرات محیطی

۲۳۵
۲۳۶
۲۳۷
۲۳۸
۲۳۹
۲۴۰
۲۴۱
۲۴۲
۲۴۳
۲۴۴
۲۴۵
۲۴۶
۲۴۷
۲۴۸
۲۴۹
۲۵۰
۲۵۱
۲۵۲
۲۵۳
۲۵۴
۲۵۵
۲۵۶
۲۵۷
۲۵۸
۲۵۹
۲۶۰
۲۶۱
۲۶۲
۲۶۳
۲۶۴
۲۶۵
۲۶۶
۲۶۷
۲۶۸
۲۶۹
۲۷۰
۲۷۱
۲۷۲
۲۷۳

است و افزایش آن می‌تواند ناشی از کاهش تنفس تحریک شده یا افزایش تنفس پایه باشد (Allegri et al., 2017). بر اساس طبقه‌بندی Gorobtsova et al. (2016)، CAI بالاتر از ۰/۵ بیانگر اختلال شدید و کاهش پایداری عملکرد میکروبی است. یافته‌های پژوهش حاضر نیز نشان داد تبدیل درختچه‌زار به علفزار و اراضی زراعی با تشدید تنش محیطی، پایداری متابولیکی جوامع میکروبی را کاهش داده و CAI را افزایش داده است.

نتیجه‌گیری کلی

خاک به‌عنوان یکی از اجزای اساسی اکوسیستم‌های زمینی، تحت تأثیر مستقیم تغییرات پوشش گیاهی و مدیریت اراضی قرار دارد. نتایج نشان داد تبدیل رویشگاه طبیعی درختچه‌زار به کاربری‌های ثانویه، موجب تغییر عملکرد کلی خاک و کاهش یکپارچگی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی آن شده. همچنین کاربری اراضی، در مقایسه با عمق خاک، عامل اصلی کنترل‌کننده این تغییرات بوده است. پوشش طبیعی درختچه‌زار با ایجاد شرایط مناسب برای تجمع ماده آلی، چرخه عناصر غذایی و فعالیت زیستی، نقش کلیدی در پایداری عملکرد اکوسیستم خاک دارد. در مقابل، حذف این پوشش و جایگزینی آن با کاربری‌های کشاورزی، به‌ویژه جوزار، موجب اختلال هم‌زمان در فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک شده است. این یافته‌ها نشان می‌دهد کاهش پوشش گیاهی علاوه بر افت ذخایر غذایی، با کاهش فعالیت زیستی و تغییر روابط متقابل اجزای خاک، ظرفیت عملکردی اکوسیستم را نیز محدود می‌کند. بر این اساس، فرضیه اول پژوهش (کاهش کیفیت فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در اثر تبدیل درختچه‌زار) و فرضیه دوم (تفاوت شدت اثر تخریب بین کاربری‌های جایگزین) تأیید شدند. به‌طوری‌که شدت تغییرات در اراضی زراعی بیشتر از علفزار و جوزار بیشترین فاصله را از شرایط طبیعی درختچه‌زار نشان داد، درحالی‌که گندم‌زار افت کیفیت کمتری نسبت به جوزار داشت. بنابراین، در مناطق با اقلیم مشابه (نیمه‌خشک و کوهستانی)، رویکرد مدیریتی دوگانه شامل حفاظت از پوشش‌های چوبی باقی‌مانده و احیای اراضی تخریب‌شده با استقرار کاربری‌های زراعی مناسب‌تر، راهکاری عملی برای بهبود پایداری خاک است. با توجه به هدف مطالعه، انتخاب قطعات نمونه‌برداری در مکان‌هایی با شرایط فیزیوگرافی مشابه (ارتفاع، شیب و جهت جغرافیایی) ضروری بود که نیازمند بازدیدهای میدانی متعدد و زمان‌بر بود.

منابع

۱. بیرانوند، محمد و کوچ، یحیی. (۱۳۹۵). اثر گونه‌های درختی پهن‌برگ بر فراوانی و تنوع کرم‌های خاکی در اکوسیستم جنگلی جلگه‌ای. *زیست‌شناسی خاک*، ۱۵(۱)، ۲۶-۱۵.
۲. توکلی، محمود؛ کوچ، یحیی و اکبری‌نیا، مسلم. (۱۳۹۷). فراوانی و تنوع کرم‌ها در خاک سطحی رویشگاه‌های جنگلی تخریب و احیاشده ناحیه خزری. *مجله جنگل ایران*، ۱۰(۳)، ۳۰۶-۲۹۳.
۳. قادری، الهام. (۱۴۰۲). تأثیر ترکیب تاج‌پوشش زالزالک و زرشک بر شاخص‌های عملکرد خاک در غرب مازندران (رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران).
۴. کوچ، یحیی؛ فولادی دوقزلو، مهین و حق‌وردی، کنایون. (۱۴۰۳). اثر پوشش‌های جنگل طبیعی، جنگل کاری و مرتعی بر مشخصه‌های آلی و معدنی خاک. *مدیریت خاک و تولید پایدار*، ۱۴(۴)، ۵۲-۲۹.
۵. کهراریان، مرتضی؛ وفایی شوشتری، رضا و سلیمان‌نژادیان، ابراهیم. (۱۳۹۶). بررسی تنوع زیستی پادمان (Hexapoda: Collembola) در سه اکوسیستم مختلف در استان کرمانشاه (ایران). *گیاه‌پزشکی (مجله علمی کشاورزی)*، ۴۰(۳)، ۵۲-۳۹.
۶. میرآخورلو، خسرو و اخوان، رضا. (۱۳۹۶). ارزیابی تغییرات سطح جنگل‌های هیرکانی از سال ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۵. *طبیعت ایران*، ۲(۳)، ۴۵-۴۰.

References

Abdullahi, M.B., Elnaggar, A.A., Omar, M.M., Murtala, A., Lawal, M., & Mosa, A.A. (2023). Land degradation, causes, implications and sustainable management in arid and semi arid regions: a case study of Egypt. *Egyptian Journal of Soil Science*, 63(4), 659-676.

- Abebaw, S.E., & Feleke, T.G. (2026). Systematic Review on the Impact of Climate Change on Soil Properties: Implications for Sustainable Land Management. *Applied and Environmental Soil Science*, 2026 (1), 9005763. <https://doi.org/10.1155/aess/9005763>
- Alef, K., & Nannipieri, P. (1995). Methods in applied soil microbiology and biochemistry (Issue 631.46 M592ma). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-513840-6.X5014-9>
- Allegrini, M., Gomez, E.D.V., & Zabalo, M.C. (2017). Repeated glyphosate exposure induces shifts in nitrifying communities and metabolism of phenylpropanoids. *Soil Biology and Biochemistry*, 105, 206-215. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.11.024>
- Allison, L.E. (1975). Organic carbon. In: Black CA. Methods of soil analysis. American Society of Agronomy, Part,2.
- Anderson, T.H. & Domsch, K.H. (1990). Application of eco-physiological quotients (qCO₂ and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. *Soil Biology and Biochemistry*, 22(2), 251-255. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(90\)90094-G](https://doi.org/10.1016/0038-0717(90)90094-G)
- Ashraf, M. N., Waqas, M. A., & Rahman, S. (2022). Microbial metabolic quotient is a dynamic indicator of soil health: trends, implications and perspectives. *Eurasian Soil Science*, 55(12), 1794-1803. <https://doi.org/10.1134/S1064229322700119>
- Bayranvand, M., & Kooch, Y. (2016). The effect of broad-leaved tree species on abundance and diversity of earthworms in the flat forest ecosystem. *Journal of Soil Biology*, 4(1), 15-26. <https://doi.org/10.22092/sbj.2016.106755> (In Persian).
- Bayranvand, M., Kooch, Y., & Rey, A. (2017). Earthworm population and microbial activity temporal dynamics in a Caspian Hyrcanian mixed forest. *European Journal of Forest Research*, 136(3), 447-456. <https://doi.org/10.1007/s10342-017-1044-5>
- Blake, G. R. & Hartge, K. H. (1986). Particle density. In: Klute, A. (Ed.), Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods, 2nd ed. SSSA Book Ser. 5. ASA and SSSA, Madison, WI, 377-382. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c14>
- Bower, C. A., Reitemeier, R. F. & Fireman, M. (1952). Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Science*, 73, 251-261. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-195204000-00001>
- Brant, J.B., Myrold, D.D., & Sulzman, E.W. (2006). Root controls on soil microbial community structure in forest soils. *Oecologia*, 148(4), 650-659. <https://doi.org/10.1007/s00442-006-0402-7>
- Brookes, P. C., Landman, A., Pruden, G., & Jenkinson, D. S. (1985). Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 17(6), 837-842. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(85\)90144-0](https://doi.org/10.1016/0038-0717(85)90144-0)
- Chen, X., Yang, J., Zhu, X., Liang, X., Lei, Y., & He, C. (2016). N-fixing trees in wetland restoration plantings: effects on nitrogen supply and soil microbial communities. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(24), 24749-24757. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7454-y>
- Cheng, M., Xiang, Y., Xue, Z., An, S., & Darboux, F. (2015). Soil aggregation and intraaggregate carbon fractions in relation to vegetation succession on the Loess Plateau, China. *Catena*, 124, 77-84. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.09.006>
- Chi, Y., Shi, H., Wang, X., Qin, X., Zheng, W., & Peng, S. (2016). Impact factors identification of spatial heterogeneity of herbaceous plant diversity on five southern islands of Miaodao Archipelago in North China. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 34, 937-951. <https://doi.org/10.1007/s00343-016-5111-4>
- Cla, A., Nwafor, I.A., & Chibuike, G.U. (2015). Contributions of microorganisms to soil fertility in adjacent forest, fallow and cultivated land use types in Nsukka, Nigeria. *International Journal of Agriculture*, 5(3), 199-204. <https://doi.org/10.5923/j.ijaf.20150503.04>
- Cook, F.J., & Orchard, V.A. (2008). Relationships between soil respiration and soil moisture. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(5), 1013-1018. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.12.012>
- De Martonne, E. (1926). Une nouvelle fonction climatologique: L'indice d'aridité. *Meteorologie*, 2, 449-459
- DÖNMEZ, A. A. (2004). The genus *Crataegus* L. (Rosaceae) with special reference to hybridisation and biodiversity in Turkey. *Turkish Journal of Botany*, 28(1), 29-37.
- Dungait, J.A., Hopkins, D.W., Gregory, A.S., & Whitmore, A.P. (2012). Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance. *Global change biology*, 18(6), 1781-1796. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02665>

۲۷۴
۲۷۵
۲۷۶
۲۷۷
۲۷۸
۲۷۹
۲۸۰
۲۸۱
۲۸۲
۲۸۳
۲۸۴
۲۸۵
۲۸۶
۲۸۷
۲۸۸
۲۸۹
۲۹۰
۲۹۱
۲۹۲
۲۹۳
۲۹۴
۲۹۵
۲۹۶
۲۹۷
۲۹۸
۲۹۹
۳۰۰
۳۰۱
۳۰۲
۳۰۳
۳۰۴
۳۰۵
۳۰۶
۳۰۷
۳۰۸
۳۰۹
۳۱۰
۳۱۱
۳۱۲
۳۱۳
۳۱۴
۳۱۵
۳۱۶
۳۱۷
۳۱۸
۳۱۹
۳۲۰
۳۲۱
۳۲۲
۳۲۳
۳۲۴
۳۲۵

- Eisenhauer, N., Sünemann, M., Pollierer, M.M., Sun, X., Bardgett, R.D., Bartkowski, B., ... & Potapov, A. (2026). Soil biodiversity effects on ecosystems. *Nature Reviews Biodiversity*, 1-16. <https://doi.org/10.1038/s44358-025-00123-z>
- Eslaminejad, P., Heydari, M., Kakhki, F.V., Mirab-Balou, M., Omidipour, R., Muñoz-Rojas, M., & Lucas-Borja, M.E. (2020). Plant species and season influence soil physicochemical properties and microbial function in a semi-arid woodland ecosystem. *Plant and Soil*, 456(1), 43-59. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04691-1>
- Faber-Langendoen, D., Keeler-Wolf, T., Meidinger, D., Tart, D., Hoagland, B., Josse, C., ... & Comer, P. (2014). EcoVeg: a new approach to vegetation description and classification. *Ecological Monographs*, 84(4), 533-561.
- Filipović, A., Perčin, A., Hadžiabulić, A., & Mandić, A. (2024). Transformation of organic matter and impact on the ecosystem. In *Agroforestry for carbon and ecosystem management* (pp. 311-329). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95393-1.00018-X>
- Gemada, A.R. (2021). Soil acidity challenges to crop production in Ethiopian highlands and management strategic options for mitigating soil acidity for enhancing crop productivity. *Agriculture, Forestry and Fisheries*, 10(6), 245-261. DOI:10.11648/j.aff.20211006.15
- Ghaderi, E., 2023. In: The Effect of Canopy Composition of Black Hawthorn and Barberry on Soil Function Indicators in Western Mazandaran. *Tarbiat Modares Unievrsity*, p. 211p. (In Persian).
- Gorobtsova, O. N., Gedgafova, F. V., Uligova, T. S., & Tembotov, R. K. (2016). Ecophysiological indicators of microbial biomass status in chernozem soils of the Central Caucasus (in the territory of Kabardino-Balkaria with the Terek variant of altitudinal zonation). *Russian journal of ecology*, 47(1), 19-25. <https://doi.org/10.1134/S1067413616010069>
- Hafner, S.D., Groffman, P.M., & Mitchell, M.J. (2005). Leaching of dissolved organic carbon, dissolved organic nitrogen, and other solutes from coarse woody debris and litter in a mixed forest in New York State. *Biogeochemistry*, 74(2), 257-282. <https://doi.org/10.1007/s10533-004-4722-6>
- Horn, R.F. (2021). Soils in agricultural engineering: Effect of land-use management systems on mechanical soil processes. *Hydrogeology, chemical weathering, and soil formation*, 187-199. <https://doi.org/10.1002/9781119563952.ch10a>
- Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological applications*, 10(2), 423-436.
- Kahrarian, M., Vafae Shoushtari, R., & SoleymanNejadian, E. (2017). Study on biodiversity of springtails (Hexapoda: Collembola) in three different ecosystems in Kermanshah province, Iran. *Plant Protection (Scientific Journal of Agriculture)*, 40(3), 39-52. <https://doi.org/10.22055/PPR.2017.18484.1264> (In Persian).
- Kemper, W. D., & Rosenau, R. C. (1986). Aggregate stability and size distribution. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 5, 425-442. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17>
- Kooch, Y., & Ghaderi, E. (2023). The effect of Crataegus and Berberis canopy types on bioindicators of soil quality in a semi-arid climate. *Journal of Arid Environments*, 208, 104862. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104862>
- Kooch, Y., & Noghre, N. (2020). Nutrient cycling and soil-related processes under different land covers of semi-arid rangeland ecosystems in northern Iran. *Catena*, 193, 104621. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104621>
- Kooch, Y., Doghozlo, M. F., & Haghverdi, K. (2025). The effect of natural forest cover, afforestation and pasture on soil organic and mineral characteristics. DOI: 10.22069/EJSMS.2025.22139.2134(In Persian).
- Lagerlöf, J., Goffre, B., & Vincent, C. (2002). The importance of field boundaries for earthworms (Lumbricidae) in the Swedish agricultural landscape. *Agriculture, ecosystems & environment*, 89(1-2), 91-103. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00321-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00321-8)
- Lavelle, P. (1988). Earthworm activities and the soil system. *Biology and fertility of soils*, 6(3), 237-251.
- Li, N., Zhang, X.P., & Zhang, L.M. (2014). Macro-soil fauna guilds in Korean pine plantation forest and secondary forest. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 1, 22-29.
- Liu, Y., Wang, S., Wang, Z., Zhang, Z., Qin, H., Wei, Z., ... & Deng, Y. (2019). Soil microbiome mediated nutrients decline during forest degradation process. *Soil Ecology Letters*, 1(1), 59-71. <https://doi.org/10.1007/s42832-019-0009-7>

۳۲۶
۳۲۷
۳۲۸
۳۲۹
۳۳۰
۳۳۱
۳۳۲
۳۳۳
۳۳۴
۳۳۵
۳۳۶
۳۳۷
۳۳۸
۳۳۹
۳۴۰
۳۴۱
۳۴۲
۳۴۳
۳۴۴
۳۴۵
۳۴۶
۳۴۷
۳۴۸
۳۴۹
۳۵۰
۳۵۱
۳۵۲
۳۵۳
۳۵۴
۳۵۵
۳۵۶
۳۵۷
۳۵۸
۳۵۹
۳۶۰
۳۶۱
۳۶۲
۳۶۳
۳۶۴
۳۶۵
۳۶۶
۳۶۷
۳۶۸
۳۶۹
۳۷۰
۳۷۱
۳۷۲
۳۷۳
۳۷۴
۳۷۵
۳۷۶
۳۷۷

- Lombao, A., Buján, A. I. B., González, J. J. C., Jiménez, A. M., & Raviña, M. D. (2015). Impact of thermal shock on forest soils affected by fires of different severity and recurrence. *Spanish Journal of Soil Science: SJSS*, 5(2), 165-179. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2015.V5.N2.06>
- Matute, M. M. (2013). Soil nematodes of Brassica rapa: influence of temperature and pH. *Advances in Natural Science*, 6(4), 20-26.
- Meyfroidt, P., Vu, T.P., & Hoang, V.A. (2013). Trajectories of deforestation, coffee expansion and displacement of shifting cultivation in the Central Highlands of Vietnam. *Global Environmental Change*, 23(5), 1187-1198. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.04.005>
- Mirakhorlou, K., & Akhavan, R. (2017). Area changes of Hyrcanian Forests during 2004 to 2016. *Iran Nature*, 2(3), 40-45. <https://doi.org/10.22092/irn.2017.112967> (In Persian).
- Montané, F., Romanya, J., Rovira, P., & Casals, P. (2010). Aboveground litter quality changes may drive soil organic carbon increase after shrub encroachment into mountain grasslands. *Plant and Soil*, 337(1), 151-165. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0512-1>
- Murphy, D.J., & Yong, S. (2026). Global Carbon Sequestration and the Roles of Tropical Forests and Crops: Prospects for Using Innovative Carbon Trading Approaches to Address the Climate Emergency. *Earth*, 7(1), 22. <https://doi.org/10.3390/earth7010022>
- Myers-Smith, I.H., & Hik, D.S. (2013). Shrub canopies influence soil temperatures but not nutrient dynamics: an experimental test of tundra snow–shrub interactions. *Ecology and evolution*, 3(11), 3683-3700. <https://doi.org/10.1002/ece3.710>
- Nelson, D. W. a, & Sommers, L. (1983). Total carbon, organic carbon, and organic matter. Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties, 9, 539–579. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>
- Pankaj, Devi, A., Jhariya, M.K., Banerjee, A., & Bargali, S.S. (2026). Grassland degradation: ecological aspects for sustainable management. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s43538-026-00721-1>
- Parsapour, M.K., Kooch, Y., Hosseini, S.M., & Alavi, S.J. (2018). Litter and topsoil in Alnus subcordata plantation on former degraded natural forest land: a synthesis of age sequence. *Soil and Tillage Research*, 179, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.01.008>
- Piri, A.S., Kooch, Y., & Hojjati, S.M. (2025). Changes in soil multifunctional properties in semi-arid environments are dependent on ecosystem health. *Catena*, 254, 108978. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108978>
- Ren, X., Zhang, J., Bah, H., Müller, C., Cai, Z., & Zhu, B. (2021). Soil gross nitrogen transformations in forestland and cropland of Regosols. *Scientific Reports*, 11(1), 223. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80395-x>
- Rezaei, S.A., & Gilkes, R. J. (2005). The effects of landscape attributes and plant community on soil chemical properties in rangelands. *Geoderma*, 125(1-2), 167-176. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.07.010>
- Robertson, G. P., Coleman, D. C., Sollins, P., & Bledsoe, C. S. (1999). Standard soil methods for long-term ecological research (Vol. 2). Oxford University Press on Demand.
- Salamon, J.A., Schaefer, M., Alphei, J., Schmid, B., & Scheu, S. (2004). Effects of plant diversity on Collembola in an experimental grassland ecosystem. *Oikos*, 106, 51–60. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2004.12905.x>
- Sarto, M.V., Borges, W.L., Sarto, J.R., Pires, C.A., Rice, C.W., & Rosolem, C.A. (2020). Soil microbial community and activity in a tropical integrated crop-livestock system. *Applied Soil Ecology*, 145, 103350. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.08.012>
- Scharenbroch, B. C., & Catania, M. (2012). Soil quality attributes as indicators of urban tree performance. *Arboriculture & Urban Forestry (AUF)*, 38(5), 214-228. <https://doi.org/10.48044/jauf.2012.030>
- Sebhateab, M. (2014). Impact of land use and land cover change on soil physical and chemical properties: a case study of Era-Hayelom tabias, northern Ethiopia. Land Restoration Training Programme Keldnaholt, 112.
- Six, J., Callewaert, P., Lenders, S., De Gryze, S., Morris, S.J., Gregorich, E.G., Paul, E.A. & Paustian, K. (2002). Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Science Society of America Journal*, 66(6), 1981-1987. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1981>

۳۷۸
۳۷۹
۳۸۰
۳۸۱
۳۸۲
۳۸۳
۳۸۴
۳۸۵
۳۸۶
۳۸۷
۳۸۸
۳۸۹
۳۹۰
۳۹۱
۳۹۲
۳۹۳
۳۹۴
۳۹۵
۳۹۶
۳۹۷
۳۹۸
۳۹۹
۴۰۰
۴۰۱
۴۰۲
۴۰۳
۴۰۴
۴۰۵
۴۰۶
۴۰۷
۴۰۸
۴۰۹
۴۱۰
۴۱۱
۴۱۲
۴۱۳
۴۱۴
۴۱۵
۴۱۶
۴۱۷
۴۱۸
۴۱۹
۴۲۰
۴۲۱
۴۲۲
۴۲۳
۴۲۴
۴۲۵
۴۲۶
۴۲۷
۴۲۸

- Suthar, S. (2012). Seasonal dynamics in earthworm density, casting activity and soil nutrient cycling under Bermuda grass (*Cynodon dactylon*) in semiarid tropics, India. *Environmentalist*, 32, 503–511. <https://doi.org/10.1007/s10669-012-9419-0>.
- Tardy, V., Mathieu, O., Lévêque, J., Terrat, S., Chabbi, A., Lemanceau, P., ... & Maron, P.A. (2014). Stability of soil microbial structure and activity depends on microbial diversity. *Environmental microbiology reports*, 6(2), 173-183. <https://doi.org/10.1111/1758-2229.12126>
- Tavakoli, M., Kooch, Y., & Akbarinia, M. (2018). Frequency and diversity of worms in topsoil of degraded and reclaimed forest habitats of the Caspian region. *Iranian Journal of Forest*, 10 (3), 293–306. (In Persian).
- United States Department of Agriculture, 2014. Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. USDA Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Wang, Q., Xiao, F., He, T., & Wang, S. (2013). Responses of labile soil organic carbon and enzyme activity in mineral soils to forest conversion in the subtropics. *Annals of forest science*, 70, 579–587. <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0294-8>
- Wen-Jie, W.A.N.G., Ling, Q., Yuan-Gang, Z.U., Dong-Xue, S.U., Jing, A., Hong-Yan, W.A.N.G., Guan-Yu, Z.H.E.N.G., Wei, S., & Xi-Quan, C.H.E.N. (2011). Changes in soil organic carbon, nitrogen, pH and bulk density with the development of larch (*Larix gmelinii*) plantations in China. *Global Change Biology*, 17(8), 2657-2676. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02447.x>
- Wollum, A. G. (1982). Cultural methods for soil microorganisms. *Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties*, 9, 781-802. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c37>
- WoWood, M. (1995). *Environmental soil biology*, 2nd ed., Blackie Academic and Professional, Glasgow, 150. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-011-0625-2>
- Zancan, S., Trevisan, R. & Paoletti, M. G. (2006). Soil algae composition under different agro-ecosystems in North-Eastern Italy. *Agric Ecosyst Environ*, 112(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.06.018>
- Zhang, Q., Fan, J., & Zhao, X. (2025). Effect of shrubland-to-grassland conversion on soil water storage and infiltration capacity in loess plateau region of China. *Catena*, 249, 108720. [10.1016/j.catena.2025.108720](https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108720)

Effects of shrubland degradation and conversion to grassland and cropland on Soil Properties

Abstract

Introduction: Vegetation, as one of the fundamental components of terrestrial ecosystems, plays a crucial role in maintaining ecological processes, conserving biodiversity, and regulating soil functions. The type and composition of plant communities directly influence the physical, chemical, and biological properties of soil through their effects on nutrient cycling, litter production, soil moisture and temperature regulation, erosion reduction, and runoff control. In natural ecosystems, vegetation serves not only as the primary source of organic matter input to the soil but also enhances ecosystem stability by stimulating microbial activity and improving soil structure. Natural vegetation is commonly classified according to the dominant growth form and vegetation structure, including forests and various rangeland vegetation types such as grasslands and shrublands. Among rangeland vegetation types, shrublands represent one of the most important plant communities. The shrub canopy can improve soil quality by moderating soil temperature and moisture, increasing litter accumulation, and providing favorable conditions for soil biological activity. Changes in vegetation cover resulting from human activities, which disrupt nutrient cycling, are among the most important factors contributing to declines in soil quality and productivity. In semi-arid regions, shrublands are among the dominant and most important vegetation types and play a crucial role in maintaining the stability of soil nutrient cycles. Although numerous studies have investigated the effects of different vegetation types on soil properties, information on the impacts of shrubland conversion to other land-use types on the physical, chemical, and biological properties of soils remains limited.

Methods: To investigate the effects of land-cover types on soil properties, preliminary surveys and field visits were conducted, and sections of the aforementioned lands were selected that were contiguous with each other and showed minimal differences in elevation above sea level, minimal variation in slope percentage, and slope aspect. Accordingly, in each study habitat, three 1-hectare plots were selected with a minimum distance of 500 m from each other. In each 1-hectare plot, four soil samples (30 cm × 30 cm) were collected from depths of 0–10, 10–20, and 20–30 cm. In total, 36 soil samples were collected from each habitat and transferred to the laboratory for analysis. To assess the normality of the data and the homogeneity of variances, the Kolmogorov–Smirnov and Levene's tests were applied, respectively. Soil properties under different land-use types were analyzed using two-way analysis of variance (ANOVA). When statistically significant differences were detected ($p \leq 0.05$), Duncan's multiple range test was used for mean comparisons.

Results: The results of the analysis of variance indicated a statistically significant difference in most soil properties among the studied habitats. The obtained results showed that the lowest values of bulk density, sand, and silt belonged to the shrubland habitat. The maximum value of porosity was observed in shrubland, while the minimum value was recorded in cropland (barley). In addition, shrubland and cropland (barley) habitats showed the highest and lowest values of soil aggregate stability and clay content, respectively.

Furthermore, the highest soil temperature was observed in the cropland (barley). Overall, the highest values of soil chemical properties, including pH, EC, organic carbon, total nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, and magnesium, were observed in the shrubland habitat, whereas the lowest values of these indices were mainly associated with the cropland (barley). In contrast to other indices, the C/N ratio showed its highest value in the cropland (barley). The highest abundance and biomass of all ecological groups of earthworms were observed in the shrubland habitat, and these values significantly decreased following the conversion of this habitat to grassland, cropland (wheat), and cropland (barley). This reduction was more pronounced in the epigeic and anecic groups, such that their abundance in the lower soil layers of croplands reached zero. In contrast, endogeic earthworms were present at all depths, with their highest abundance observed at the 20–30 cm soil depth. The highest abundance of nematodes, protozoa, bacteria, and fungi was observed in shrubland, while the lowest values were recorded in cropland (barley). On average, the density of these organisms in shrubland was approximately 2–3, 3–4, and 4–5 times higher than in grassland, cropland (wheat) and cropland (barley) respectively. The highest and lowest values of basal and substrate-induced respiration, as well as microbial biomass (carbon, nitrogen, and phosphorus), were observed in shrubland and cropland (barley), respectively. Moreover, these indices significantly decreased with increasing soil depth. In contrast, the qCO_2 and CAI indices showed their highest values in cropland (barley) and were, on average, about four times higher than in shrubland.

Conclusion: This study demonstrated that land use was the primary factor influencing soil quality, whereas soil depth had a comparatively limited effect. Shrubland exhibited more favorable physical conditions, including lower bulk density, higher porosity and soil moisture, and greater aggregate stability, all of which provide a suitable environment for optimal soil functioning. In contrast, agricultural lands, particularly barley fields, showed the highest bulk density and the lowest porosity and soil moisture, indicating a greater susceptibility to soil degradation and erosion. In terms of chemical properties, the higher concentrations of organic matter and essential nutrients (N, P, K, Ca, and Mg) in shrubland indicate that woody vegetation not only enhances organic matter inputs but also promotes the stability of nutrient cycling. Conversely, the depletion of these nutrients in agricultural lands suggests that land-use conversion can substantially impair the soil's capacity for nutrient storage and cycling. Biological indicators followed a similar pattern. Shrubland supported significantly higher populations of earthworms, Collembola, mites, nematodes, and protozoa than agricultural lands, demonstrating that woody vegetation provides a more stable and favorable habitat for soil biota. Furthermore, microbial respiration and microbial biomass carbon (MBC), nitrogen (MBN), and phosphorus (MBP) reached their highest values in shrubland. In contrast, the microbial efficiency indices, namely the metabolic quotient (qCO_2) and the Carbon Availability Index (CAI), were higher in agricultural lands, reflecting lower microbial efficiency under degraded soil conditions. Overall, the findings highlight the critical role of woody vegetation in maintaining the physical, chemical, and biological quality of soils. Therefore, conserving woody vegetation should be considered a priority in natural resource management programs. At the same time, in degraded areas affected by land-use change, replacing or restoring intensive agricultural systems with less stressful cropping systems, such as wheat cultivation instead of barley cultivation, may partially improve soil properties and mitigate soil quality degradation. Consequently, in regions with similar semi-arid mountainous climates, an integrated management strategy that combines the conservation of remaining woody vegetation with the restoration of degraded lands through the establishment of more sustainable agricultural land uses can serve as an effective approach to enhancing soil functioning and long-term ecosystem sustainability.

Keywords: Land use, degradation natural habitats, woody vegetation, enzyme activity, soil fertility.

٤٨٦
٤٨٧
٤٨٨
٤٨٩
٤٩٠
٤٩١
٤٩٢
٤٩٣
٤٩٤
٤٩٥
٤٩٦
٤٩٧
٤٩٨
٤٩٩
٥٠٠
٥٠١
٥٠٢
٥٠٣
٥٠٤
٥٠٥
٥٠٦
٥٠٧
٥٠٨
٥٠٩
٥١٠
٥١١
٥١٢
٥١٣
٥١٤
٥١٥
٥١٦
٥١٧
٥١٨
٥١٩
٥٢٠
٥٢١