مجلهٔ جنگل ایران، انجمن جنگلبانی ایران
سال هجدهم، شمارهٔ ۱، بهار ۱۴۰۵
ص ۱۱۰-۸۷
مقاله پژوهشی

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22034/ijf.2025.529482.2053
CC BY 4.0

تغییر شاخص‌های میکروبی و حاصلخیزی زیستی خاک تحت تأثیر انباشت زباله در جنگل‌های هیرکانی

یحیی کوچ[1*]، کتایون حق‌وردی[2]، اعظم نورائی[3]، سمانه حاجی‌میرزا آقایی[3]، مجتبی امیری[4]، سعید شعبانی[5] و مهرداد زرافشار[6]

[1]دانشیار گروه مرتعداری، دانشکدهٔ منابع طبیعی و علوم دریایی نور، دانشگاه تربیت مدرس، ایران.
[2]استادیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران.
[3]دکتری علوم و مهندسی جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران.
[4]دانشیار گروه محیط زیست، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
[5]استادیار پژوهشی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران.
[6]دانشیار گروه جنگلداری و تکنولوژی چوب، دانشکدهٔ تکنولوژی، دانشگاه لینه، وکخو، سوئد.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۳)

چکیده

مقدمه: لندفیل یا انباشت باز زباله از پرکاربردترین روش‌های مدیریت زبالهٔ جامد شهری در سراسر جهان محسوب می‌شود. در حال حاضر بسیاری از مکان‌های انباشت زبالهٔ فعال در کشورهای در حال توسعه فاقد سیستم جمع‌آوری شیرابه و امکانات تصفیه مناسب هستند که سبب آسیب جدی به محیط زیست به‌ویژه در جنگل‌های هیرکانی شده است. با این‌حال تا کنون پژوهشی در خصوص مقایسهٔ شاخص‌های میکروبی و حاصلخیزی زیستی خاک در رویشگاه‌های طبیعی جنگلی در مکان‌های مختلف انباشت زباله در کشور گزارش نشده است. از این‌رو پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ، در چهار شهر بهشهر، شیرگاه، نور و چالوس، هم در توده‌های جنگلی مجاور (فاقد آلودگی) و هم در مکان‌های انباشت زباله انجام گرفت.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، نمونه‌برداری خاک از چهار مکان انباشت زباله در شهرهای مختلف انجام گرفت. در هر مکان، ۲۰ نمونه خاک در فصل رویش از دو عمق ۰ تا ۱۰ و ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متری برداشت شد. همچنین نمونه‌های شاهد نیز از توده‌های جنگلی مجاور و عاری از آلودگی به‌منظور مقایسه با مناطق آلوده برداشت شدند. همهٔ نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه، تحت آزمون‌های شیمیایی و زیستی قرار گرفتند. به‌منظور ارزیابی حاصلخیزی زیستی نیز از شاخص حاصلخیزی زیستی خاک[1] به‌عنوان یک معیار استاندارد استفاده شد. این شاخص بر اساس مادهٔ آلی خاک، تنفس پایه، کربن زی‌تودهٔ میکروبی کربن، ضریب متابولیک و نرخ معدنی شدن محاسبه می‌شود.

یافته‌ها: در همهٔ شهرهای بررسی‌شده، شاخص‌های آنزیمی و میکروبی خاک در مکان‌های انباشت زباله به‌طور معنی‌داری نسبت به تودهٔ جنگلی مجاور کاهش یافته و این اختلاف در همهٔ شهرها معنی‌دار بوده است ($P<0/01$). همچنین نتایج نشان داد که بیشترین و کمترین فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز، اسید فسفاتاز، آریل‌سولفاتاز و اینورتاز در هر دو عمق به‌ترتیب مربوط به شهرهای چالوس و بهشهر بوده است ($P<0/01$). افزون‌بر این، نتایج بررسی شاخص حاصلخیزی خاک در مکان‌های انباشت زباله نشان داد که هر چهار شهر در شرایط پیش از استرس و هشدار هستند و کمترین امتیاز (۹) به لحاظ شاخص حاصلخیزی زیستی خاک مربوط به بهشهر بود.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که انباشت زباله در جنگل‌های هیرکانی سبب کاهش معنی‌دار شاخص‌های میکروبی و فعالیت آنزیمی خاک و همچنین افت حاصلخیزی زیستی در مقایسه با تودهٔ جنگلی همجوار شده است. این تغییرات بیانگر تهدید جدی برای پایداری عملکرد اکوسیستم‌های جنگلی است. بنابراین از یافته‌های پژوهش حاضر می‌توان به‌طور مستقیم در مدیریت پایدار جنگل‌های هیرکانی استفاده کرد. توصیه می‌شود اقدامات مدیریتی نظیر جلوگیری از انباشت غیراصولی زباله، پایش مستمر کیفیت خاک و طراحی برنامه‌های ترمیم زیستی در مناطق آلوده به‌عنوان اولویت اجرایی در دستور کار مدیران منابع طبیعی و محیط زیست قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، انباشت زبالهٔ غیرمهندسی، جنگل طبیعی، حاصلخیزی زیستی خاک.

* نویسندهٔ مسئول
شماره تماس: ۰۹۱۱۲۹۳۲۳۱۳
ایمیل: yahya.kooch@modares.ac.ir

1. Biological Fertility Index, BFI

مقدمه

مدیریت زباله‌های جامد شهری یکی از چالش‌های اساسی زیست‌محیطی در جهان به شمار می‌آید (IPCC, 2019). در حال حاضر، چهار روش عمده برای مدیریت این پسماندها شامل مکان‌های انباشت زباله، کمپوست، بازیافت و سوزاندن به کار گرفته می‌شود (Mundial, 2018). با وجود این، هنوز حدود ۴۰ درصد از زباله‌های جهان در محل‌های دفن یا انباشت غیربهداشتی دفع می‌شوند، درحالی که تنها حدود ۱۹ درصد از طریق بازیافت و کمپوست و ۱۱ درصد از طریق سوزاندن مدرن مدیریت شده و بخش باقی‌مانده با روش‌های تخلیه و سوزاندن باز مدیریت می‌شود (Kaza et al., 2018). در این زمینه، مقدار تولید زباله با افزایش رفاه جامعه نسبت مستقیم دارد. به‌منظور اطمینان از دفع ایمن و مناسب زباله‌ها، اجرای مقررات قانونی و تخصیص اعتبار کافی ضروری است. مدیریت مسئولانهٔ زباله‌های شهری به یک نگرانی مهم بهداشت عمومی و زیست‌محیطی در مناطق مختلف تبدیل شده است (Choudhary et al., 2024; Wikurendra et al., 2024). بر اساس گزارش UNEP[1] (۲۰۲۴)، تولید جهانی زباله‌های جامد شهری در سال ۲۰۲۳ حدود ۲/۳ میلیارد تن برآورد شده است و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ به حدود ۳/۸ میلیارد تن برسد. این روند افزایشی، چالش‌های جدی در مدیریت پسماند به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه ایجاد خواهد کرد. به همین ترتیب، بانک جهانی نیز در گزارش خود پیش‌بینی کرده است که تولید جهانی زباله از ۲/۰۱ میلیارد تن در سال ۲۰۱۶ به ۳/۴ میلیارد تن در سال ۲۰۵۰ خواهد رسید (World Bank, 2018). چنین حجم زیادی از زباله‌های جامد شهری احتمالاً مشکلات بزرگی را به‌خصوص در کشورهای با درآمد کم و متوسط و در حال توسعه ایجاد می‌کند و به یک مشکل جدی در مقیاس جهانی تبدیل خواهد شد (Guerrero et al., 2013; Alam et al., 2020). کشورهای در حال توسعه به‌طور معمول به‌دلیل محدودیت منابع مالی و نداشتن تخصص فنی کافی با مشکلاتی گسترده در مدیریت مؤثر مکان‌های انباشت زباله مواجه‌اند (Karimi et al., 2019; Karimi et al., 2021). به‌طور کلی، زباله‌های جامد شهری از منابع مختلفی مانند فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی، شهری، خانگی، تجاری یا اشیای روزمرهٔ دور ریخته‌شده توسط مردم نشأت می‌گیرد. ترکیب و کیفیت زباله‌های جامد شهری بر اساس نوع فعالیت متفاوت بوده و شامل پلاستیک، کاغذ، نمک‌های معدنی، ضایعات مواد غذایی، ضایعات ساختمانی و الکترونیکی، فلزات، شیشه و ترکیبات آلی است (Rezapour et al., 2018). مقدار و کیفیت پسماند مایع تولیدی به ویژگی‌های مختلفی از جمله اندازهٔ ذرات زباله، ترکیب زباله، دما و رطوبت زباله، درجهٔ تراکم زباله، بارندگی و کیفیت مواد بیوشیمیایی موجود در هنگام تخریب زباله‌های جامد شهری بستگی دارد (Rezapour et al., 2018).

بررسی ویژگی‌های زیستی خاک با توجه به عملکرد حیاتی موجودات زنده در چرخهٔ عناصر غذایی و پایداری سیستم‌های اکولوژیکی و حساسیت زیاد این مشخصه‌ها به تغییرات و اختلالات انسانی، در ارزیابی شاخص‌های عملکردی خاک اولویت دارد (Zhang et al., 2021; Gu et al., 2022). مشخصه‌های زیستی و میکروبی خاک، عناصری حیاتی در اکوسیستم خاک محسوب می‌شوند و در فرایندهای مهمی مانند چرخهٔ کربن (C) و نیتروژن (N) کارکرد مهمی دارند. آنها همچنین به‌عنوان عوامل محوری در حاصلخیزی خاک عمل می‌کنند (Hasan et al., 2000; Zifcakova et al., 2020). در این زمینه، خاک‌های موجود در مکان‌های انباشت زباله مستعد تخریب شیمیایی هستند و در برابر اثرهای نامطلوب شیرابه‌های انباشت زباله بسیار آسیب‌پذیرند. در نتیجه، محل انباشت زباله می‌تواند تعادل اکولوژیکی اکوسیستم را مختل کند و

1. United Nations Environment Programme

سبب تغییرات گسترده در ترکیب بیوتای خاک شود (Gu et al., 2022). همانند جوامع میکروبی، آنزیم‌های خاک نیز در برابر تغییرات ناشی از مداخلات انسانی، به‌ویژه آلودگی‌های زیست‌محیطی، واکنش سریع و شدیدی نشان می‌دهند (Wydro et al., 2022). آنزیم‌ها کاتالیزور دگرگونی‌های بیولوژیکی در خاک شناخته می‌شوند. با وجود این، هر گونه اختلال در خاک به‌دلیل گسترش مواد شیمیایی و زباله ممکن است سبب تغییراتی در عملکرد خاک و فعالیت آنزیمی خاک شود. بر این اساس، فعالیت آنزیم‌ها در خاک شاخص خوبی در مدیریت تنش محسوب می‌شود و هشداری جدی در زمینهٔ تخریب خاک است (Li et al., 2014; Shailaja et al., 2021). فلزات سنگین می‌توانند پیامدهای مضر و طولانی‌مدتی بر عملکردهای مختلف خاک از جمله فعالیت آنزیم‌های موجود در خاک داشته باشند (Khan et al., 2010). آنزیم‌های خاک اثر مستقیمی در چرخهٔ مواد غذایی خاک (کربن، نیتروژن، فسفر) و تجزیهٔ مواد آلی دارند. سمیت فلزات سنگین ممکن است میل ترکیبی با تیول‌ها و دیگر گروه‌های عاملی روی مولکول‌های پروتئینی را افزایش دهد و سبب اختلال در ساختار و عملکرد آنزیم‌های خارج از سلول شود. این اختلالات ممکن است به جایگزینی فلزات طبیعی در گروه‌های پروتز آنزیمی بینجامد (Aljerf & AlMasri, 2018). افزون‌بر این، فلزات سنگین اسید دئوکسی ریبونوکلئیک (DNA) سلول‌های میکروبی را مختل می‌کنند و سنتز آنزیمی را کاهش می‌دهند (Jadoun et al., 2018). در نهایت، این مسئله به‌وضوح نشان می‌دهد که آلودگی خاک اثرهای شدیدی بر حاصلخیزی خاک دارد (Rolando et al., 2018) که در پژوهش‌های مختلف نیز تأیید شده است (Kassa et al., 2017; Bakhshandeh et al., 2019). بنابراین باید از یک سیستم شاخص جامع برای پایش حاصلخیزی خاک در بین انواع شاخص‌های زیستی و چرخه‌های بیوژئوشیمیایی استفاده شود (Francaviglia et al., 2017). در این زمینه، شاخص حاصلخیزی زیستی خاک[1] توسط Renzi et al. (2017) معرفی شد. این شاخص از برخی پارامترهای بیوشیمیایی خاک، از جمله مادهٔ آلی، کربن زی‌تودهٔ میکروبی، تنفس پایه، تنفس تجمعی، ضریب متابولیک و ضریب معدنی شدن استفاده می‌کند. بر اساس پژوهش‌های گذشته، شاخص حاصلخیزی زیستی خاک کارآمدتر از بررسی زی‌توده و فعالیت میکروبی خاک به‌تنهایی عمل می‌کند و می‌تواند برای ارزیابی کیفیت خاک در سطوح مختلف اختلالات و آلودگی‌های انسانی استفاده شود (Francaviglia et al., 2017; Renzi et al., 2017).

جنگل‌های هیرکانی همانند کمربند سبز طبیعی در شمال ایران واقع شده‌اند و از رشته‌کوه البرز تا دریای خزر امتداد دارند. عرض این جنگل‌ها حدود ۱۱۰ کیلومتر، طول آنها ۸۰۰ کیلومتر و وسعت آنها ۱/۹ میلیون هکتار است (Homami Totmaj et al., 2021) که به‌ترتیب ۱۵ درصد از کل منطقهٔ جنگلی و ۱/۱ درصد از مساحت سرزمین ایران است. جنگل‌های هیرکانی یکی از آخرین جنگل‌های معتدل پهن‌برگ جهان معرفی شده (Sagheb Talebi et al., 2014) و از نظر اکولوژیکی، اجتماعی، اقتصادی و فرهنگی دارای ارزش بسزایی است و به‌تازگی توسط سازمان یونسکو در فهرست میراث جهانی ثبت شده است (Hosseini, 2019)، در حال حاضر چند سایت انباشت زباله در بیشتر شهرهای شمالی کشور و در داخل جنگل‌های هیرکانی استقرار یافته است. این مکان‌ها که در حاشیهٔ جنگل‌های هیرکانی در شهرهای مختلف مستقر شده‌اند فاقد هرگونه عملیات مهندسی هستند و آلوده‌ترین و مخرب‌ترین آنها در نزدیکی شهرهای بهشهر، شیرگاه، نور و چالوس در استان مازندران واقع شده است. زباله‌های تولیدشده در این مکان‌ها شامل ضایعات پزشکی، مشاغل و خانه‌ها هستند. زباله‌ها دربرگیرندهٔ زباله‌های تجزیه‌پذیر و تجزیه‌ناپذیر مانند پلاستیک،

1. Biological Fertility Index; BFI

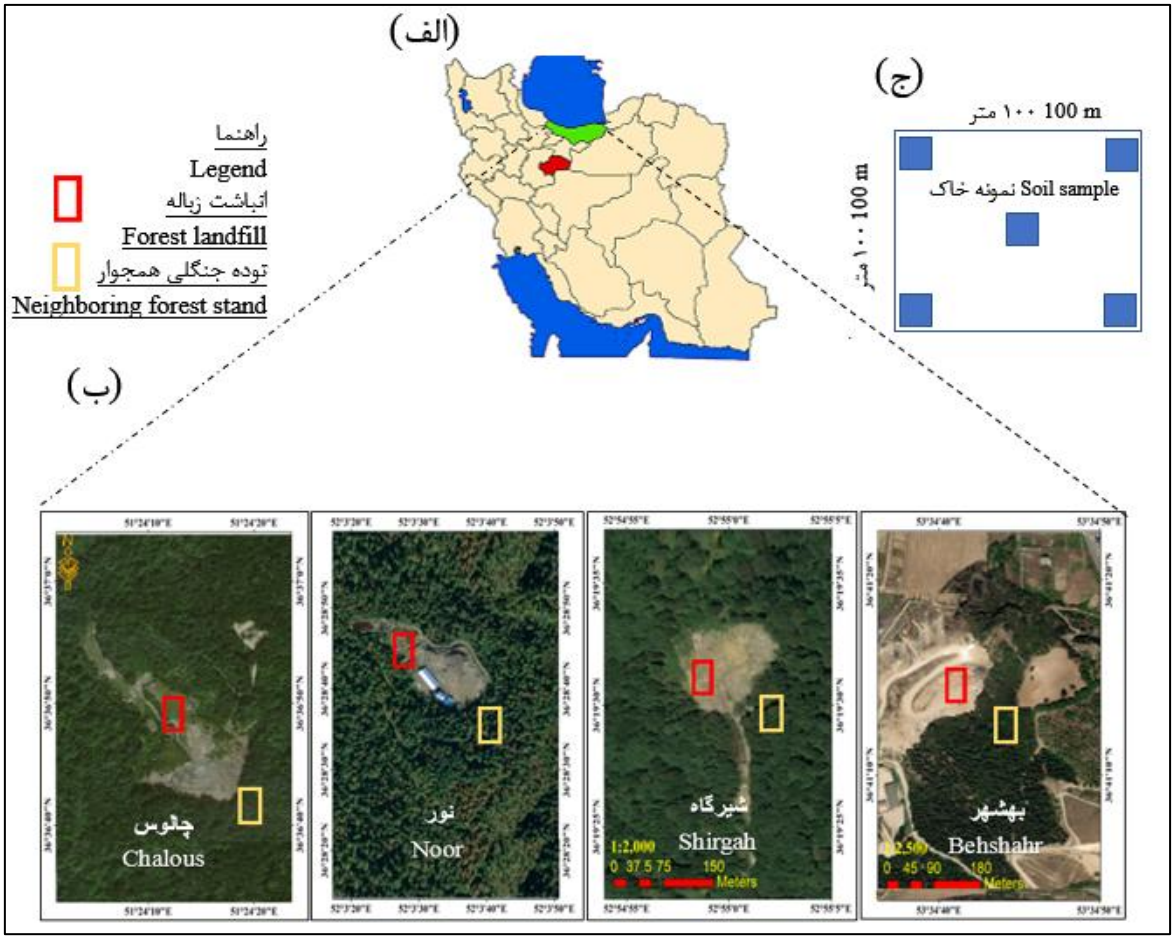
کاغذ، لاشهٔ حیوانات، چوب، فاضلاب، مواد غذایی و لوازم خانگی است (Golhosseini & Ghazizade, 2024). مکان‌های انباشت غیربهداشتی زباله ممکن است محیط زیست و سلامت خاک را در منطقهٔ هیرکانی به خطر بیندازد. بنابراین با توجه به ارزش طبیعی مناطق تحت پژوهش، اثرهای انباشت غیربهداشتی زباله بر فعالیت آنزیمی، میکروبی و شاخص حاصلخیزی زیستی خاک در این مناطق باید بررسی شود. اطلاعات کافی دربارهٔ اثرهای محل انباشت زباله در شهرهای مختلف بر شاخص‌های زیستی خاک در جنگل هیرکانی وجود ندارد.

پژوهش‌های مختلف در جهان نشان داده‌اند که انباشت و دفن غیراصولی زباله‌ها می‌تواند اثرهای جدی بر کیفیت خاک، جمعیت میکروبی و فعالیت آنزیمی آن داشته باشد. برای نمونه، تحقیقات در چین و هند نشان داده‌اند که نفوذ شیرابهٔ لندفیل موجب کاهش فعالیت آنزیم‌های مهم خاک از جمله فسفاتاز، اوره‌آز و دهیدروژناز شده و در نتیجه، چرخهٔ عناصر غذایی دچار اختلال شده است (Zhao et al., 2020; Kuwano et al., 2017). همچنین گزارش بانک جهانی بیان می‌کند که بخش زیادی از زباله‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی (Li et al., 2014; Shailaja et al., 2021)، در کشورهای در حال توسعه همچنان به‌صورت انباشت باز مدیریت می‌شوند که این امر تهدیدی جدی برای سلامت اکوسیستم‌های طبیعی به شمار می‌رود (Kaza et al., 2018). در ایران نیز پژوهش‌هایی دربارهٔ اثر شیرابهٔ لندفیل‌های شهری بر خاک نشان داده‌اند که افزایش غلظت آلاینده‌ها سبب کاهش چشمگیر فعالیت میکروارگانیسم‌های مفید و آنزیم‌های خاک شده است (Sadeghi-Poor Sheijany et al., 2025). با وجود این، پژوهش‌های موجود اغلب به بررسی یک منطقه یا یک محل دفع زباله محدود شده‌اند و تا کنون پژوهشی مقایسه‌ای در چند شهر واقع در رویشگاه‌های طبیعی هیرکانی برای سنجش تغییرات شاخص‌های میکروبی و حاصلخیزی زیستی خاک انجام نگرفته است. از این‌رو پژوهش حاضر تلاش دارد این خلأ پژوهشی را پر کند و شواهدی کاربردی برای مدیریت پایدار جنگل‌های هیرکانی فراهم آورد. هدف اصلی این پژوهش تنها نشان دادن کاهش فعالیت آنزیم‌های مفید در خاک‌های آلوده به زباله نبود، بلکه تمرکز آن بر مقایسهٔ شدت و الگوی این تغییرات در شهرهای مختلف بود. این رویکرد امکان شناسایی مناطق دچار بیشترین آسیب‌پذیری را فراهم می‌سازد و می‌تواند مبنایی برای اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی قرار گیرد. همچنین به‌کارگیری شاخص‌های حاصلخیزی زیستی خاک به‌عنوان ابزار ارزیابی، نتایج کاربردی مهمی برای مدیران منابع طبیعی و محیط زیست دارد و می‌تواند پایه‌ای برای طراحی و اجرای برنامه‌های پایش، بازسازی و پیشگیری از انباشت غیراصولی زباله در جنگل‌های هیرکانی باشد. بر این اساس، فرضیهٔ این پژوهش بیان می‌کند که وجود طولانی‌مدت شیرابه در حاشیهٔ جنگل‌های هیرکانی بر فعالیت‌های میکروبی خاک و آنزیم‌ها و متعاقب آن شاخص‌های زیستی خاک به‌ویژه در اکوسیستم‌های خشک‌تر و شکننده‌تر تأثیر بیشتری خواهد داشت.

منطقهٔ پژوهش

این پژوهش در مکان‌های انباشت زباله در حاشیهٔ جنگل‌های هیرکانی در چهار شهر بهشهر، شیرگاه، نور و چالوس انجام گرفت (شکل ۱). مکان‌های انباشت زباله در شهرهای تحت بررسی اثرهای زیست‌محیطی و تخریب بیشتری را متحمل شده‌اند. با توجه به اینکه شهرهای یادشده از شرق تا غرب مازندران پراکنش دارند. هر یک از مکان‌های انباشت زباله در چهار شهر بهشهر، شیرگاه، نور و چالوس، شرایط فیزیوگرافی به‌نسبت مشابه و پوشش جنگلی به‌نسبت یکسان داشته‌اند. سن لندفیل‌ها در همهٔ سایت‌ها بیشتر از ۲۰ سال است. محل‌های بررسی‌شده در محدودهٔ جنگل‌های هیرکانی قرار دارند و در گذشته دارای

پوشش جنگلی انبوه بوده‌اند. اما به‌دلیل فعالیت‌های انسانی به‌ویژه دفن و انباشت غیرمهندسی زباله، پوشش گیاهی این مناطق تخریب شده و از بین رفته است. در هر چهار سایت، ارتفاع از سطح دریا بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ متر، شیب ۱۵ درصد و جهت شمالی است. سنگ بستر شامل سنگ آهک دولومیتی از اوایل کرتاسه تا اواخر ژوراسیک است. میانگین بارش سالیانه در چهار شهر بهشهر، شیرگاه، نور و چالوس به‌ترتیب ۶۳۴، ۶۷۶، ۸۸۶ و ۸۸۹ میلی‌متر و میانگین دما نیز به‌ترتیب ۲۳، ۲۱/۹، ۱۸/۹ و ۱۸/۱ است. هر چهار منطقه دارای تیپ‌های درختی ممرز (*Carpinus betulus* L.)، انجیلی (*Parrotia persica* C.A. Meyer.) به‌همراه گونه‌های توسکا (*Alnus subcordata* C.A. Mey.)، افرا (*Acer velutinum* Boiss.) و لرگ (*Pterocarya fraxinifolia* Lam.) هستند. گونه‌های علفی غالب در این مناطق شامل *Astragalus gossypinus* Fisch، *Rhamnus pallasii* Fisch. & C.A. Mey.، *Hypericum androsaemum* L. و *Thymus transcaspicus* Klokov. هستند. در چند سال گذشته ذخیره‌سازی پسماندهای جامد شهری در مجاورت این جنگل‌ها آغاز شد و پسماندهای این مناطق شامل پسماندهای شهری، بیمارستانی، خانگی، صنعتی، گردشگران و غیره است. این مکان‌های انباشت زباله توسط جنگل احاطه شده است و زباله‌ها بدون هیچ‌گونه عملیات مهندسی در شرایط غیربهداشتی و کنترل‌نشده انباشته می‌شوند.



شکل ۱- موقعیت منطقهٔ پژوهش در شمال ایران، استان مازندران (الف)؛ نمایش قطعات نمونه در مناطق مختلف (ب)؛ طرح نمونه‌گیری برای هر رویشگاه تحت بررسی (ج)

Figure 1. The location of the studied area in the north of Iran, Mazandaran province (a), showing sample plots in the area (b), sampling plan for each studied habitat (c)

روش نمونه‌برداری و تجزیهٔ آزمایشگاهی

در هر یک از مکان‌های انباشت زباله در چهار شهر (با شرایط فیزیوگرافی به‌نسبت مشابه و پوشش جنگلی به‌نسبت یکسان)، ۲۰ نمونه خاک در فصل رویش، از دو عمق ۰ تا ۱۰ و ۱۰-۲۰ سانتی‌متری گرفته شد. افزون‌بر این نمونه‌های کنترل از تودهٔ جنگلی نزدیک به محل انباشت زباله و فاقد آلودگی جمع‌آوری شدند. برای اجرای این پژوهش، در هر شهر چهار قطعه نمونه به مساحت یک هکتار (ابعاد ۱۰۰ × ۱۰۰ متر) در دو کاربری جنگل طبیعی و مکان آلوده در داخل محل دفن زباله انتخاب شد. قطعات نمونه در فاصلهٔ ۳۰۰ تا ۴۰۰ متری از یکدیگر قرار داشتند. شرایط سنگ بستر، ویژگی‌های فیزیوگرافی و شرایط اقلیمی در همهٔ مکان‌های نمونه‌برداری مشابه بود. نمونه‌های خاک از پنج نقطه شامل چهار گوشه و مرکز هر قطعه برداشت شدند. نمونه‌برداری از دو عمق خاک (۰ تا ۱۰ و ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر) و در داخل مربع‌هایی به ابعاد ۳۰ × ۳۰ سانتی‌متر انجام گرفت. نمونه‌های خاک شاهد در یک جنگل طبیعی نزدیک به محل دفن زباله جمع‌آوری شدند. فاصله‌ای حدود ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ متر بین محل دفن زباله و محل شاهد در نظر گرفته شد. نمونه‌های جمع‌آوری‌شده خاک برای آزمایش‌های میکروبی و زیستی به محیط آزمایشگاه انتقال داده شدند. یک بخش از نمونه‌های خاک برای آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی، پس از هواخشک شدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شده و بخش دوم نمونه‌ها برای آزمایش‌های زیستی تا زمان آزمایش در دمای ۴ درجهٔ سانتی‌گراد نگهداری شد. برای سنجش فعالیت آنزیمی بر اساس رنگ تولیدشده از روش‌های استاندارد ارائه‌شده توسط Alef و Nannipieri در سال ۱۹۵۵ استفاده شد. ضریب متابولیکی (qCO_2) از تقسیم دی‌اکسید کربن (میلی‌گرم کربن) آزادشده در هر ساعت از هر گرم خاک (در تنفس پایه) بر زی‌تودهٔ میکروبی کربن خاک (گرم) محاسبه شد (Cheng et al., 1993). برای ارزیابی تأثیر سایت‌های مختلف انباشت زباله بر مقدار فراهمی کربن خاک، شاخص قابلیت دسترسی به کربن (CAI) با استفاده از رابطهٔ (Cheng et al. 1993) و تقسیم تنفس پایه به تنفس برانگیخته محاسبه شد. سهم میکروبی (MR) از تقسیم زی‌تودهٔ میکروبی کربن به کربن آلی خاک (Parkinson & Coleman, 1991) به دست آمد. میانگین هندسی فعالیت‌های آنزیمی (GME)[1] با استفاده از جذر مجموع فعالیت چهار آنزیم اوره‌آز، فسفاتاز، آریل‌سولفاتاز و اینورتاز (Hinojosa et al., 2004; Paz-Ferreiro et al., 2012) محاسبه شد. تنوع عملکردی خاک از فعالیت چهار آنزیم با استفاده از شاخص تنوع شانون– وینر[2] (H′) محاسبه شد (Paz-Ferreiro et al., 2012). میانگین هندسی فعالیت‌های آنزیمی با استفاده از معادلهٔ ۱ محاسبه شد:

رابطه ۱ $$GME = \sqrt[5]{Urease + ALP + ACP + Invertase + Aryl}$$

در این رابطه Urease، ALP، ACP، Invertase و Aryl به‌ترتیب اوره، فعالیت قلیایی و اسیدی فسفاتاز، اینورتاز و آریل‌سولفاتاز را نشان می‌دهد (Hinojosa et al., 2004; Paz-Ferreiro et al., 2012). تنوع عملکردی فعالیت‌های آنزیمی خاک با استفاده از شاخص شانون-وینر، به‌صورت زیر محاسبه شد. تنوع عملکردی خاک از فعالیت چهار آنزیم با استفاده از شاخص تنوع شانون (Paz-Ferreiro et al., 2012) محاسبه شد:

رابطه ۲ $$H = -\sum_{i=1}^{5} P_i LnP_i$$

هر P_i با نسبت هر فعالیت آنزیم به مجموع تمام فعالیت‌های آنزیمی بستگی دارد.

اندازه‌گیری شاخص حاصلخیزی خاک

یکی از شاخص مؤثر در برآورد حاصلخیزی بیولوژیکی خاک توسط Pompili et al. (2008) و Renzi et al. (2017) برای پایش حاصلخیزی خاک در ایتالیا پیشنهاد شد. این شاخص بر اساس مادهٔ آلی

1. Geometric mean of the activity of the enzymes; GME
2. Shannon–Wiener Diversity Index; H′

خاک (مادهٔ آلی خاک= کربن آلی خاک× ۱/۷۲۴)، تنفس پایه، کربن زی‌تودهٔ میکروبی کربن، ضریب متابولیک و نرخ معدنی شدن محاسبه می‌شود. اندازه‌گیری تنفس پایه و تنفس برانگیختهٔ خاک با استفاده از روش بطری بسته[1] و روش اصلاح‌شدهٔ آن انجام گرفت. زی‌توده‌های میکربی به روش تدخین-استخراج در محیط آزمایشگاه سنجیده شد (Brookes et al., 1982). تخمین ضریب متابولیک بر اساس تقسیم تنفس پایه بر و زی‌تودهٔ میکروبی کربن محاسبه شد (Anderson & Domsch, 1990). نرخ معدنی شدن کربن و نیتروژن با استفاده از روش انکوباسیون آزمایشگاهی تعیین شد (Raiesi et al., 2012a; Raiesi et al., 2012b). جدول امتیازدهی برای برآورد این شاخص محاسبه شده است (جدول‌های ۱ و ۲). هر پارامتر بر اساس مقادیر عددی اندازه‌گیری‌شده امتیاز بین ۵-۱ را دریافت کرد. مجموع امتیازات برای هر پارامتر ارائه‌دهندهٔ طبقات پیشنهادی شاخص حاصلخیزی خاک است.

جدول ۱- امتیازات فواصل مقادیر برای پارامترهای مختلف

Table 1. Scores of value intervals for different parameters

مشخصه‌های خاک Soil Parameter	امتیاز Score				
	1	2	3	4	5
مادهٔ آلی خاک (درصد) Soil organic matter SOM (٪)	<0.1	≥0.1 ≤15	>1.5 ≤2	>2 ≤3	>0.3
تنفس پایه (میلی‌گرم کربن در کیلوگرم خاک) Basal respiration (mg CO2–C kg^{-1} soil d^{-1})	<5	≥5 ≤10	>10 ≤15	>15 ≤20	>20
تنفس تجمعی (میلی‌گرم کربن در کیلوگرم خاک) Cumulative respiration (mg CO^2–C kg^{-1} soil)	<100	≥100 ≤250	>250 ≤400	>400 ≤600	>600
زی‌تودهٔ میکروبی کربن (میلی‌گرم بر کربن) Microbial biomass C (mg kg^{-1})	<100	≥100 ≤200	>200 ≤300	>300 ≤400	>400
ضریب متابولیک Metabolic quotient (qCO_2)	≤ 0.4	<0.4 ≥0.3	<0.3 ≥0.2	<0.2 ≥0.1	<0.01
ضریب معدنی شدن Mineralization quotient	<1	≥1 ≤2	>2 ≤4	>3 ≤4	>4

جدول ۲- طبقه‌بندی شاخص حاصلخیزی خاک

Table 2. Classes of the Biological Fertility Index (BFI)

	I	II	III	IV	V
	استرس Stress	پیش از استرس (هشدار) Pre-stress (alarm)	متوسط Medium	خوب Good	زیاد High
مجموع شاخص حاصلخیزی خاک BFI scores sum	6	7-12	13-18	19-24	25-30

روش تحلیل[1]

به‌منظور بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون کولموگروف– اسمیرنوف ($p > 0.05$) استفاده شد. همگنی واریانس‌ها نیز با آزمون لون ارزیابی شد. برای تجزیه‌وتحلیل داده‌ها از مدل خطی عمومی در نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۳ استفاده شد. این مدل معادل آنالیز واریانس سه‌عامله (Three-way ANOVA) است

1. Closed bottle method

و به‌منظور بررسی اثر اصلی سه عامل مستقل شامل شهر (چالوس، نور، شیرگاه و بهشهر)، شرایط آلودگی (جنگل طبیعی و محل دفن زباله) و عمق خاک (۰ تا ۱۰ و ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر) و همچنین اثرهای برهم‌کنش آنها بر شاخص‌های میکروبی خاک به‌کار رفت. میانگین‌های استفاده‌شده در تجزیه‌وتحلیل، میانگین حسابی مقادیر اندازه‌گیری‌شده بودند. در مواردی که اثرهای معنی‌دار مشاهده شد، مقایسهٔ میانگین‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن انجام گرفت. افزون‌بر این، برای بررسی همبستگی بین متغیرها از همبستگی پیرسون استفاده شد.

نتایج

مشخصه‌های بیوشیمی (آنزیمی) و میکروبی خاک

نتایج حاصل از تجزیهٔ واریانس مشخصه‌های بیوشیمیایی خاک بیانگر آن است که فعالیت آنزیم اوره‌آز، فسفاتاز، سولفاتاز، اینورتاز، میانگین هندسی فعالیت آنزیمی، ضریب متابولیکی، سهم میکروبی و شاخص قابلیت دسترسی به کربن در شهرهای مختلف اختلاف معنی‌داری داشت. همهٔ مشخصه‌های یادشده دارای اختلاف معنی‌داری در سایت انباشت زباله و مناطق کنترل (تودهٔ جنگلی مجاور) هستند. اثر تغییرات عمق نیز در بیشتر مشخصه‌ها دارای تفاوت آماری معنی‌داری است (جدول ۳ الف و ب).

جدول ۳ (الف)- تجزیهٔ واریانس مشخصه‌های میکروبی خاک در سایت‌های انباشت زباله در شهرهای مختلف (چالوس، نور، شیرگاه و بهشهر)، در شرایط مختلف آلودگی (انباشت زباله و تودهٔ جنگلی مجاور) و اعماق مختلف

Table 3. A- Analysis of variance of soil microbial characteristics in waste accumulation sites in different cities (Chalous, Noor, Shirgah and Behshahr), in different pollution conditions (waste accumulation and adjacent forest stand) and different depths

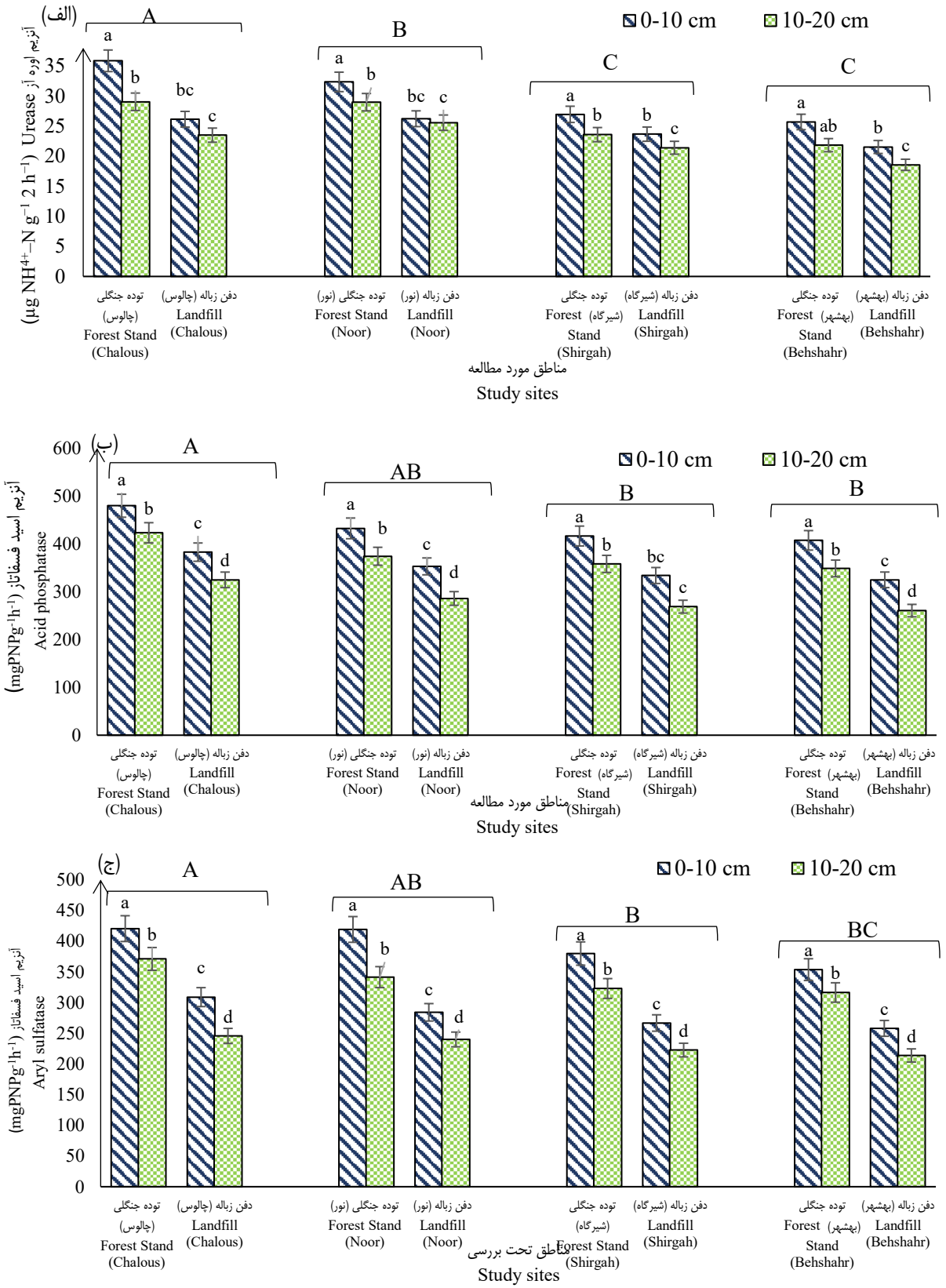
مشخصه Properties	شهر (موقعیت) Location		شرایط آلودگی Pollution conditions		عمق Depth		موقعیت×شرایط آلودگی Pollution conditions× Location	
	مقدار F F value	معنی‌داری Sig	مقدار F F value	معنی‌داری Sig	مقدار F F value	معنی‌داری Sig	مقدار F F value	معنی‌داری Sig
آنزیم اوره‌آز Urease	12.225	0.000	6.293	0.000	18.700	0.000	0.195	0.900
آنزیم اسیدفسفاتاز Acid phosphatase	4.303	0.047	20.155	0.000	9.575	0.000	0.026	0.994
آنزیم آریل‌سولفاتاز Aryl sulfatase	5.210	0.029	18.575	0.000	6.517	0.011	0.207	0.882
آنزیم اینورتاز Invertase	2.076	0.103	34.348	0.000	12.020	0.001	0.105	0.957
میانگین فعالیت‌های آنزیمی Geometric mean enzyme activities	3.199	0.024	39.356	0.000	22.575	0.000	0.166	0.919
تنوع عملکردی فعالیت‌های آنزیمی Functional diversity of enzyme activities	5.522	0.058	12.226	0.000	2.364	0.125	0.583	0.627
ضریب متابولیکی Metabolic coefficient	4.009	0.008	5.453	0.004	4.449	0.036	4.161	0.007
سهم میکروبی Microbial ratio	3.089	0.027	4.310	0.013	0.063	0.802	1.824	0.143
شاخص قابلیت دسترسی به کربن Carbon availability index	3.817	0.039	6.815	0.009	0.257	0.612	1.987	0.116

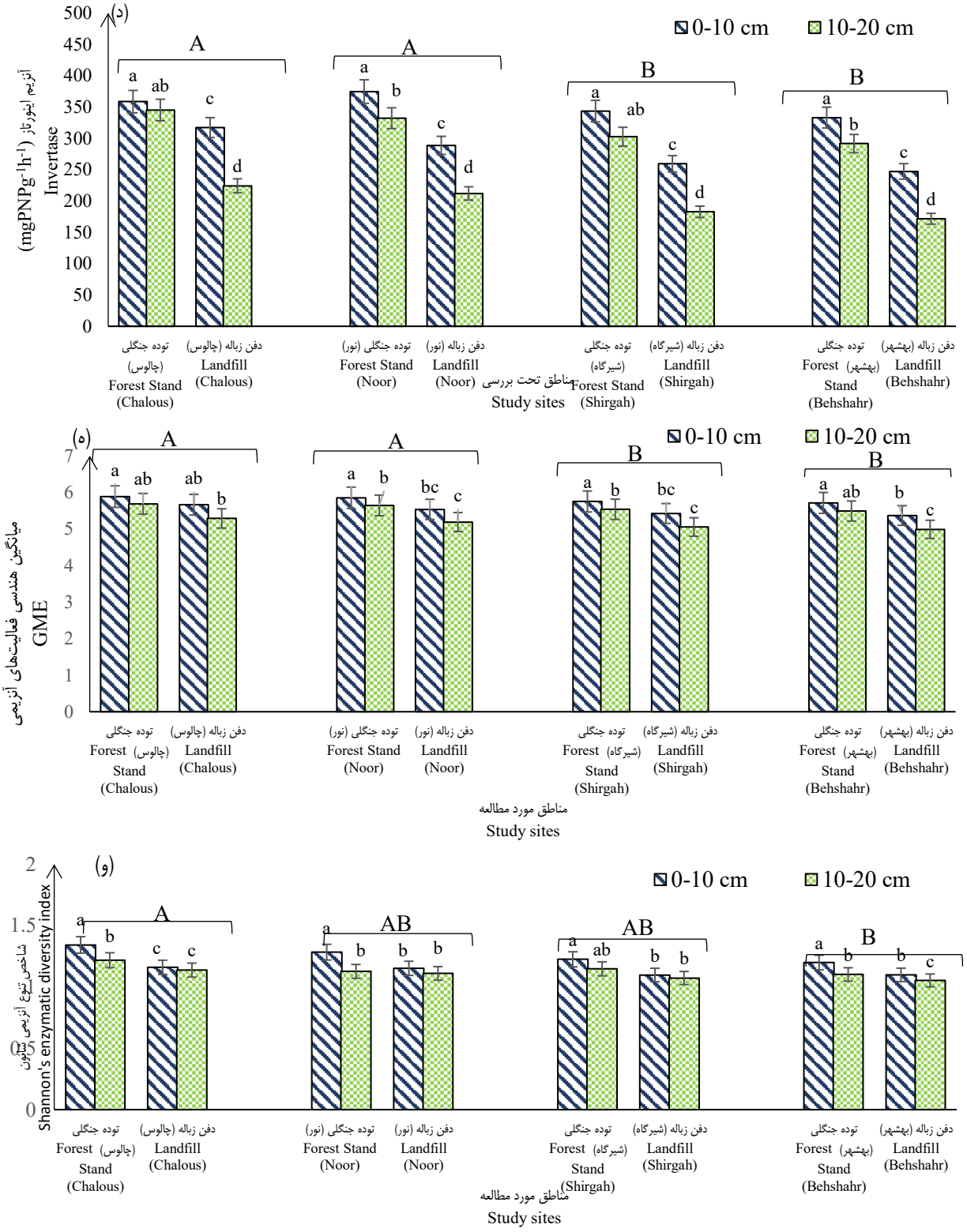
جدول ۳ (ب)- ادامه

Table 3B. (Continued)

مشخصه Properties	موقعیت× عمق Location × Depth		شرایط آلودگی×عمق Pollution conditions× Depth		موقعیت×شرایط آلودگی×عمق Location ×Pollution conditions× Depth	
	مقدار F F value	معنی‌داری Sig	مقدار F F value	معنی‌داری Sig	مقدار F F value	معنی‌داری Sig
آنزیم اوره‌آز Urease	0.167	0.919	0.423	0.516	0.179	0.911
آنزیم اسیدفسفاتاز Acid phosphatase	0.004	1.000	0.021	0.886	0.002	1.000
آنزیم آریل‌سولفاتاز Aryl sulfatase	0.010	0.999	0.335	0.563	0.008	0.999
آنزیم اینورتاز Invertase	0.008	0.999	1.909	0.168	0.114	0.952
میانگین فعالیت‌های آنزیمی Geometric mean enzyme activities	0.007	0.999	1.657	0.199	0.005	1.000
تنوع عملکردی فعالیت‌های آنزیمی Functional diversity of enzyme activities	0.054	0.983	0.623	0.431	0.104	0.958
ضریب متابولیکی Metabolic coefficient	1.077	0.359	15.575	***0.000***	0.901	0.129
سهم میکروبی Microbial ratio	0.267	0.849	0.015	0.904	0.403	0.751
شاخص قابلیت دسترسی به کربن Carbon availability index	1.443	0.239	4.648	***0.032***	0.186	0.906

نتایج حاصل از بررسی تغییرات فعالیت آنزیمی در مکان‌های مختلف انباشت زباله در شهرهای مختلف (چالوس، نور، شیرگاه و بهشهر) نشان داد که بیشترین و کمترین فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز، اسید فسفاتاز، آریل‌سولفاتاز و اینورتاز در هر دو عمق به‌ترتیب مربوط به شهرهای چالوس و بهشهر بوده است و این اختلاف به لحاظ آماری معنی‌دار (P<۰/۰۱) ارزیابی شد (شکل ۲). نتایج این پژوهش نشان داد که در همهٔ شهرهای بررسی‌شده فعالیت آنزیمی در مکان‌های انباشت زباله به‌طور معنی‌داری نسبت به تودهٔ جنگلی مجاور کاهش یافته و این اختلاف در همهٔ شهرها معنی‌دار بوده است (P<۰/۰۱). در خصوص شاخص میانگین هندسی فعالیت‌های آنزیمی و تنوع عملکردی آنزیمی (شاخص شانون- وینر)، بیشترین مقدار این شاخص در شهرهای چالوس و نور و کمترین مقدار مربوط به بهشهر بوده است (شکل ۱). مکان‌های انباشت زباله در همهٔ شهرها سبب کاهش فعالیت‌های آنزیمی و تنوع عملکردی آنزیمی (شاخص شانون- وینر) شده‌اند و این اختلاف به لحاظ آماری معنی‌دار است. سایت‌های انباشت زباله در هر دو عمق در همهٔ مناطق بررسی‌شده سبب کاهش فعالیت‌های آنزیمی خاک شده است.


(الف)
(ب)
(ج)
0-10 cm
10-20 cm
آنزیم اوره آز Urease (µg NH4+–N g−1 2 h−1)
آنزیم اسید فسفاتاز Acid phosphatase (mgPNPg-1h-1)
آنزیم اسید فسفاتاز Aryl sulfatase (mgPNPg-1h-1)
توده جنگلی (چالوس) Forest Stand (Chalous)
دفن زباله (چالوس) Landfill (Chalous)
توده جنگلی (نور) Forest Stand (Noor)
دفن زباله (نور) Landfill (Noor)
توده جنگلی (شیرگاه) Forest Stand (Shirgah)
دفن زباله (شیرگاه) Landfill (Shirgah)
توده جنگلی (بهشهر) Forest Stand (Behshahr)
دفن زباله (بهشهر) Landfill (Behshahr)
مناطق مورد مطالعه
Study sites



شکل ۲- میانگین ± (اشتباه معیار) فعالیت آنزیم اوره‌آز (الف)، اسیدفسفاتاز (ب)، آریل سولفاتاز (ج)، اینورتاز (د)، میانگین هندسی فعالیت آنزیمی (ه) و شاخص تنوع آنزیمی شانون (و) در مناطق تحت بررسی (حروف بزرگ مختلف نشان‌دهندهٔ تفاوت معنی‌دار (P<۰/۰۵) در شهرهای مختلف؛ حروف کوچک مختلف نشان‌دهندهٔ تفاوت معنی‌دار (P<۰/۰۵) در دو شرایط مختلف آلودگی در دو عمق)

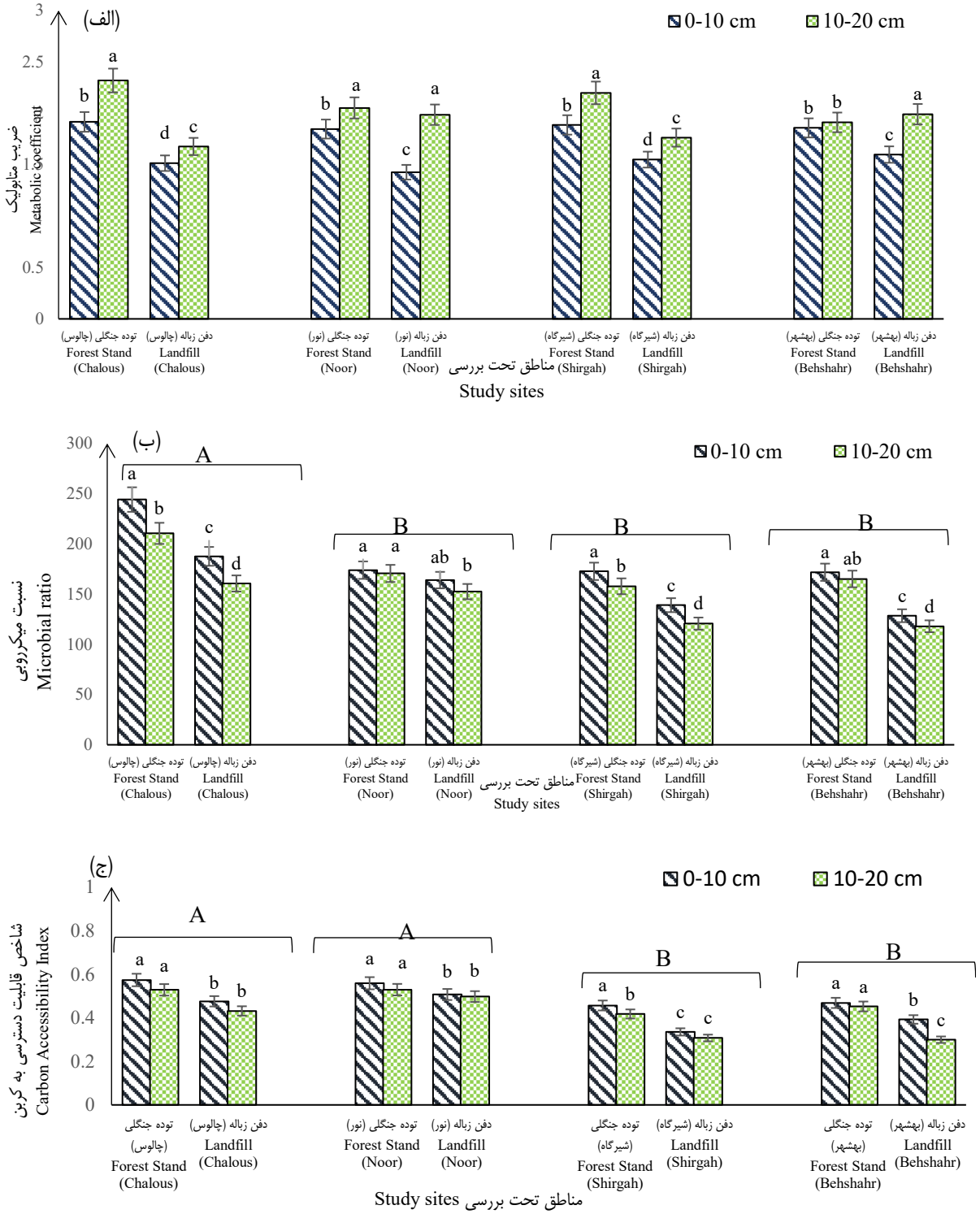
Figure 2. Average ± (SE) enzyme activity of Urease (a), Acid phosphatase (b), Arylsulfatase (c), Invertase (d), geometric average of enzymatic activity (e), and Shannon's enzymatic diversity index (v) in the various locations (Capital letters). Lower letters indicate significant differences (P<0.05) in two different conditions at two depths

نتایج بررسی تغییرات شاخص‌های میکروبی خاک در مکان‌های مختلف انباشت زباله در شهرهای مختلف (چالوس، نور، شیرگاه و بهشهر) نشان داد که بیشترین شاخص ضریب متابولیک، نسبت میکروبی و شاخص قابلیت دسترسی به کربن در هر دو عمق به‌ترتیب مربوط به شهرهای چالوس و کمترین شاخص مربوط به شهرهای شیرگاه و بهشهر بوده و این اختلاف به لحاظ آماری معنی‌دار (P<۰/۰۱) است (شکل ۳). نتایج این پژوهش نشان داد که در همهٔ شهرهای بررسی‌شده شاخص‌های میکروبی خاک در مکان‌های انباشت زباله به‌طور معنی‌داری نسبت به تودهٔ جنگلی مجاور کاهش یافته و این اختلاف به لحاظ آماری معنی‌دار (P<۰/۰۱) است.

نتایج تحلیل همبستگی پیرسون شاخص‌های زیستی و آنزیمی خاک (جدول ۴) نشان داد که بین اغلب ویژگی‌های زیستی خاک روابط معنی‌داری وجود دارد. همان‌گونه که در نقشهٔ حرارتی مشاهده می‌شود، شاخص‌های حاصلخیزی زیستی و فعالیت‌های آنزیمی خاک ارتباط تنگاتنگی با هم دارند که بیانگر پیوستگی عملکرد زیستی خاک در پاسخ به آلودگی ناشی از انباشت زباله است. شاخص حاصلخیزی زیستی (BFI) همبستگی مثبت و معنی‌داری با فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز، اسیدفسفاتاز، آریل‌سولفاتاز و اینورتاز نشان داد که این موضوع بیانگر تأثیر مستقیم فعالیت میکروبی و چرخهٔ زیستی خاک است. همچنین بین شاخص عملکردی کلی آنزیم‌ها و بقیهٔ آنزیم‌ها همبستگی بسیار قوی مشاهده شد که نشان می‌دهد تغییرات آنزیمی به‌صورت همزمان و هماهنگ در خاک اتفاق می‌افتد. از سوی دیگر، شاخص qCO_2 همبستگی منفی معنی‌داری با برخی شاخص‌های زیستی مانند نسبت میکروبی (MBC/Corg) و BFI داشت که بیانگر افزایش تنفس میکروبی در خاک‌های تحت تنش آلودگی و کاهش کارایی زیستی میکروارگانیسم‌هاست.

شاخص حاصلخیزی زیستی خاک در مکان‌های مختلف انباشت زباله

نتایج حاصل از بررسی شاخص حاصلخیزی زیستی خاک در شهرهای مختلف در شرایط متفاوت آلودگی شامل سایت انباشت زباله و جنگل مجاور (شاهد) نشان داد که اکوسیستم جنگلی در هر چهار شهر در شرایط حاصلخیزی متوسط (با مجموع امتیاز ۱۸-۱۳) قرار دارد. کمترین شاخص حاصلخیزی در توده‌های جنگلی مربوط به بهشهر (با مجموع امتیاز ۱۳) و بیشترین شاخص مربوط به چالوس با (با مجموع امتیاز ۱۸) بوده است. افزون‌بر این، نتایج بررسی شاخص حاصلخیزی خاک در مکان‌های انباشت زباله نشان داد که هر چهار شهر در شرایط پیش از استرس و هشدار هستند (جدول ۵)، به‌ویژه بهشهر با کمترین امتیاز (با مجموع امتیاز ۹) به لحاظ شاخص حاصلخیزی زیستی خاک از امتیاز بسیار کمی برخوردار است.



شکل ۳- میانگین ± (اشتباه معیار) شاخص ضریب متابولیک (الف)، نسبت میکروبی (ب) و شاخص قابلیت دسترسی به کربن (ج) در مناطق تحت بررسی (حروف بزرگ مختلف نشان‌دهندهٔ تفاوت معنی‌دار (P<۰/۰۵) در شهرهای مختلف؛ حروف کوچک مختلف نشان‌دهندهٔ تفاوت معنی‌دار (P<۰/۰۵) در دو وضعیت مختلف آلودگی در دو عمق)

Figure 2. Mean ± (standard error) of metabolic coefficient index (a), microbial ratio (b) and carbon availability index (c) in the study areas (different capital letters indicate significant differences (P<0.05) in different cities; different lowercase letters indicate significant differences (P<0.05) in two different pollution conditions at two depths)

جدول ۴- ضرایب همبستگی پیرسون بین مشخصه‌های خاک

Table 4. Pearson correlation coefficients between soil characteristics

مشخصه‌های خاک	ضریب میکروبی qCO_2	نسبت زی‌تودهٔ میکروبی Microbial ratio	شاخص فعالیت کربن CAI	اوره‌آز Urease	اسید فسفاتاز Acid phosphatase	آریل‌سولفاتاز Arylsulfatase	اینورتاز Invertase	میانگین هندسی فعالیت‌های آنزیمی GME	شاخص تنوع آنزیمی (شانون- وینر) H	شاخص حاصلخیزی زیستی BFI
ضریب میکروبی qCO_2	1	-0.3***	0.42***	0.17**	-0.01	-0.04	-0.02	-0.01	-0.08	-0.02
نسبت زی‌تودهٔ میکروبی Microbial ratio		1	-0.1	-0.13*	0.03	0.03	-0.01	0.0	-0.0	-0.14*
شاخص فعالیت کربن CAI			1	0.0	0.1	0.03	0.01	0.06	0.04	0.17**
اوره‌آز Urease				1	0.1	0.08	0.41***	0.3***	0.19***	0.55***
اسید فسفاتاز Acid phosphatase					1	0.28***	0.32***	0.71***	0.39***	0.47***
آریل‌سولفاتاز Arylsulfatase						1	0.25***	0.73***	0.1	0.68***
اینورتاز Invertase							1	0.68***	0.18**	0.62***
میانگین هندسی فعالیت‌های آنزیمی GME								1	-0.06	0.7***
شاخص تنوع آنزیمی (شانون- وینر) H									1	0.6***
شاخص حاصلخیزی زیستی BFI										1

جدول ۵- شاخص حاصلخیزی زیستی خاک در شهرهای تحت بررسی

Table 4. Soil biological fertility index in the studied cities

منطقه	شهرهای تحت بررسی Cities studied sites			
	چالوس Chalous	نور Noor	شیرگاه Shirgah	بهشهر Behshahr
سایت انباشت زباله Landfill site	12	11	10	9
تودهٔ جنگلی مجاور Forest stand	18	16	14	12
سایت انباشت زباله Landfill site	پیش از استرس (هشدار) II Pre-stress (alarm)	پیش از استرس (هشدار) II Pre-stress (alarm)	پیش از استرس (هشدار) II Pre-stress (alarm)	پیش از استرس (هشدار) II Pre-stress (alarm)
تودهٔ جنگلی مجاور Forest stand	متوسط III Medium	متوسط III Medium	متوسط III Medium	متوسط III Medium

بحث

فعالیت‌های آنزیمی و میکروبی خاک عناصر اساسی چرخهٔ کربن و نیتروژن‌اند و شاخص مهمی برای سلامت و حاصلخیزی خاک به شمار می‌روند (Zifcakova, 2020). این فرایندها به‌سرعت به استرس‌های محیطی واکنش نشان می‌دهند و ابزار کارآمدی برای پایش کیفیت خاک محسوب می‌شوند (Avidano et al., 2005). شیرابهٔ محل‌های دفن زباله از مهم‌ترین آلاینده‌هایی است که بر خاک و جوامع میکروبی آن اثر مستقیم می‌گذارد (Jabłońska-Trypuć et al., 2021; Teng et al., 2021). بنابراین سنجش فعالیت‌های آنزیمی و شاخص‌های زیستی راهکاری مناسب برای ارزیابی اثر آلاینده‌ها، به‌ویژه ترکیبات آلی و فلزات سنگین است (Kandziora-Ciupa et al., 2021; He et al., 2006). یافته‌های این پژوهش نشان داد که فعالیت آنزیم‌های خاک در توده‌های جنگلی به‌طور معنی‌داری بیشتر از مکان‌های انباشت زباله است. این امر را می‌توان ناشی از ورودی مداوم مواد آلی در جنگل‌های طبیعی دانست که بستر مناسبی برای رشد میکروارگانیسم‌ها و افزایش فعالیت‌های آنزیمی فراهم می‌سازد (Sinsabaugh et al., 2008; Burns et al., 2013). در مقابل، خاک‌های واقع در محل دفن زباله تحت تأثیر شیرابه قرار دارند که غنی از فلزات سنگین، ترکیبات سمی و مواد آلی تجزیه‌پذیر است و با ایجاد شرایط نامطلوب، تعادل جمعیت میکروبی را بر هم می‌زند و سبب سرکوب فعالیت آنزیم‌ها می‌شود (Jabłońska-Trypuć et al., 2021; Kandziora-Ciupa et al., 2021). افزون‌بر این، تغییر در ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مانند کاهش مادهٔ آلی، تغییرات pH و محدودیت اکسیژن در این مکان‌ها می‌تواند اثر مهمی در افت فعالیت آنزیمی داشته باشد، درحالی که خاک‌های جنگلی از شرایط پایدارتر و حاصلخیزتری برخوردارند (Nannipieri et al., 2012). با این‌حال، همهٔ آنزیم‌ها به‌طور یکسان تحت تأثیر مکان‌های دفن زباله قرار نگرفته‌اند و اثرگذاری آن نیز در شهرهای مختلف متفاوت بوده است. اوره آز آنزیمی است که در طی فرایند آن، اوره به دی‌اکسید کربن و آمونیاک هیدرولیز می‌شود و در اصل سبب افزایش واکنش (pH) خاک می‌شود (Martinez-Salgado et al., 2010). همان‌طور که پیشتر ذکر شد، آنزیم‌ها شاخص‌های بسیار حساسی‌اند که به‌سرعت به هر گونه اختلال ناشی از فعالیت‌های انسانی پاسخ می‌دهند (Wydro et al., 2022). تغییر در فعالیت آنزیم‌های خاک به‌دلیل تغییرات در مادهٔ آلی خاک، جوامع میکروبی و فعالیت‌های میکروبی مرتبط با عملکردهای بیولوژیکی خاک است که تحت تأثیر اجزای غیرزیستی و زیستی قرار دارند (Kujur et al., 2014). بنابراین تفاوت در ریزاقلیم خاک که می‌تواند ساعت‌ها، هفته‌ها، به‌صورت فصلی یا سال‌ها به‌عنوان بازخورد شیرابهٔ محل دفن زباله طول بکشد، بر فعالیت‌های آنزیمی تأثیر می‌گذارد (Steinweg et al., 2013). حفظ کربن آلی خاک عامل مهمی در حمایت از زیست‌تودهٔ میکروبی خاک و فعالیت آنزیمی است (Zhao et al., 2018). اسید فسفاتاز نوعی از آنزیم‌های برون سلولی است که با معدنی کردن فسفات، آن را برای گیاه به‌صورت قابل جذب درمی‌آورد (Rao et al., 2000). کاهش محتوای رطوبت و حاصلخیزی خاک (Silva et al., 2019) سبب کاهش فعالیت این آنزیم در مکان‌های دفن زباله به‌ویژه در بهشهر شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که فعالیت همهٔ آنزیم‌های بررسی‌شده شامل اوره‌آز، فسفاتاز اسیدی، آریل‌سولفاتاز و اینورتاز در خاک توده‌های جنگلی به‌طور معنی‌داری بیشتر از مکان‌های انباشت زباله بوده است. اوره‌آز آنزیمی مهم در چرخهٔ نیتروژن است که مسئول هیدرولیز اوره و آزادسازی آمونیوم است و کاهش فعالیت آن در خاک‌های آلوده می‌تواند بیانگر اختلال در فرایندهای نیتریفیکاسیون و دسترسی گیاهان به نیتروژن باشد (He et al., 2006). فسفاتاز اسیدی که در معدنی‌سازی ترکیبات آلی فسفر نقش دارد، نیز در

مکان‌های آلوده کاهش نشان داد؛ پدیده‌ای که می‌تواند حاصل تجمع آلاینده‌ها و تغییر pH خاک باشد که موجب سرکوب میکروارگانیسم‌های تولیدکنندهٔ آنزیم می‌شود (Nannipieri et al., 2012). آریل‌سولفاتاز به‌طور مستقیم در چرخهٔ سولفور مشارکت دارد و حساسیت آن به حضور فلزات سنگین و ترکیبات سمی سبب می‌شود در مکان‌های انباشت زباله به‌شدت کاهش یابد (Kandziora-Ciupa et al., 2021). در نهایت، اینورتاز به‌عنوان آنزیمی مهم در تجزیهٔ کربوهیدرات‌ها و تأمین انرژی برای میکروارگانیسم‌ها، در خاک جنگلی فعالیت بیشتری داشت که ناشی از ورود مستمر مواد آلی و بقایای گیاهی است، درحالی که خاک آلوده به شیرابه به‌دلیل فشارهای سمی و کاهش جمعیت میکروبی، ظرفیت آن را از دست می‌دهد (Burns et al., 2013). در مجموع، کاهش همزمان این چهار آنزیم شاخص روشنی از تأثیر منفی انباشت زباله بر چرخه‌های زیست‌ژئوشیمیایی خاک و حاصلخیزی زیستی آن محسوب می‌شود. در نهایت، یکی از اجزای مهم سمیت برخی فلزات، تجمع زیستی آنهاست که می‌تواند سبب ورود فلزات به زنجیره‌های غذایی (Stasinos et al., 2014) و پیامدهای بالقوه برای موجودات زنده و فعالیت آنزیم‌ها شود (Igalavithana et al., 2017; Maphuhla et al., 2021).

بررسی نتایج نشان داد که شاخص ضریب متابولیک (qCO_2)در خاک‌های آلوده به زباله به‌طور معنی‌داری نسبت به توده‌های جنگلی افزایش یافته است. این شاخص در بهشهر بیشترین مقدار را داشت (۲/۵۹ در عمق دوم)، درحالی که در جنگل مجاور تنها ۱/۹۱ ثبت شد. افزایش qCO_2 نشان می‌دهد که میکروارگانیسم‌ها برای حفظ عملکرد پایه انرژی بیشتری مصرف می‌کنند و بخش کمتری از کربن ورودی به خاک صرف تولید زی‌توده می‌شود. این موضوع به‌طور مستقیم نشان‌دهندهٔ اختلال در چرخهٔ کربن خاک است، زیرا مصرف ناکارآمد منابع کربنی می‌تواند به کاهش تجمع مادهٔ آلی پایدار منجر شود (Anderson & Domsch, 1990). در مقابل، در نور و شیرگاه مقادیر qCO_2 کمتر بود که می‌تواند ناشی از فروپاشی زی‌توده میکروبی و کاهش فعالیت تنفسی در اثر شدت بیشتر آلودگی باشد. نسبت میکروبی (MBC:OC) نیز الگوی متفاوتی را نشان داد. در چالوس، مقادیر MBC:OC بیشتر بود (۱۶۰/۵۶ در عمق دوم برای جنگل و ۱۳۳/۹۲ در عمق اول در محل انباشت زباله) که بیانگر بیشتر بودن توان نسبی میکروارگانیسم‌ها در ذخیره‌سازی کربن و مشارکت در چرخهٔ کربن است. اما در شیرگاه و بهشهر این شاخص به‌طور چشمگیری کاهش یافت (۱۵۷/۷۵ و ۲۱۷/۹۷ در محل انباشت زباله نسبت به ۱۶۸/۶۶ و ۲۳۰/۶۲ در جنگل) که نشان‌دهندهٔ کاهش سهم میکروارگانیسم‌ها در کنترل چرخهٔ کربن و نیتروژن است. کاهش MBC:OC افزون‌بر محدود کردن ظرفیت تثبیت کربن، می‌تواند به کاهش معدنی‌سازی نیتروژن و در نتیجه افت حاصلخیزی خاک منجر شود (Wardle, 1995). شاخص قابلیت دسترسی به کربن (CAI)نیز در تمام مکان‌های آلوده کمتر از جنگل بود. در شیرگاه، CAI از ۰/۵۱۷ در جنگل به ۰/۳۰۸ در محل انباشت زباله کاهش یافت و در بهشهر نیز افت مشابهی مشاهده شد (۰/۴۶۴ در جنگل به ۰/۲۹۹ در محل انباشت زباله). کاهش شاخص قابلیت دسترسی به کربن بیانگر کاهش توان میکروارگانیسم‌ها در استفاده از منابع کربنی و در نتیجه کند شدن چرخهٔ تجزیهٔ مواد آلی است. این امر می‌تواند به انباشت مواد آلی سطحی و کاهش تجزیه توسط موجودات خاکزی منجر شود، همان‌طور که Tyler (1975) و Szili-Kovács et al. (2024) گزارش کردند. کاهش همزمان qCO_2، MBC:OCو CAI در مکان‌های آلوده حاکی از آن است که چرخه‌های اصلی خاک (کربن، نیتروژن و فسفر) به‌طور مستقیم تحت تأثیر قرار گرفته‌اند. کاهش فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز و فسفاتاز که در همین پژوهش ثبت شد، نشان‌دهندهٔ اختلال در معدنی‌سازی نیتروژن و فسفر است، درحالی که افت نسبت میکروبی و CAI

گویای محدودیت در چرخهٔ کربن است. به بیان دیگر، تخریب زیستی خاک در محل‌های دفن زباله تنها به یک مسیر محدود نمی‌شود، بلکه همزمان کل فرایندهای اکولوژیکی را تضعیف می‌کند (Giller et al., 1998; Moreno et al., 2009). از نظر مکانی، تفاوت بین شهرها ممکن است بازتابی از ترکیب زباله‌های ورودی، شدت آلودگی شیرابه و شرایط اقلیمی محلی باشد. در چالوس، سطح بالاتر شاخص‌های میکروبی احتمالاً ناشی از کیفیت بهتر بسترهای آلی یا شرایط رطوبتی مساعدتر بوده است. در مقابل، در شیرگاه و بهشهر، شدیدتر بودن آلودگی و احتمالاً غلظت‌های بیشتر فلزات سنگین سبب کاهش شدیدتر شاخص‌ها شده است. این یافته‌ها همسو با پژوهش‌های Cai et al. (2024) و Campillo-Cora et al. (2025) است که نشان داده‌اند فلزات سنگین با کاهش زی‌توده و تنوع عملکردی میکروبی چرخه‌های خاک را به‌طور جدی مختل می‌کنند. تحقیقات قبلی نشان داده است که سطوح بالای فلزات سنگین می‌تواند به روش‌های مختلف بر عملکرد میکروبی تأثیر بگذارد (Campillo-Cora et al., 2025). کاهش زی‌تودهٔ میکروبی کربن و تنفس پایه ممکن است به‌دلیل کاهش منابع کربن در دسترس برای میکروارگانیسم‌ها یا تخریب ساختار خاک ناشی از ورود آلاینده‌ها به‌ویژه فلزات سنگین رخ دهد. این تغییرات به‌طور معمول از طریق فرایندهای بیوشیمیایی مانند مهار فعالیت آنزیمی، کاهش کارایی تنفس سلولی و اختلال در متابولیسم میکروبی صورت می‌گیرد و بیانگر فشار اکولوژیکی وارد بر جامعهٔ میکروبی خاک است (Gorobtsova et al., 2016; Campillo-Cora et al., 2025). به‌طور کلی، نتایج این پژوهش تأیید می‌کند که شاخص‌های میکروبی ابزارهای بسیار حساسی برای پایش اثرهای آلودگی زباله بر چرخه‌های زیست‌ژئوشیمیایی خاک هستند. این شاخص‌ها هم تفاوت بین خاک آلوده و جنگل طبیعی را نشان دادند و هم شناسایی الگوهای منطقه‌ای تخریب در جنگل‌های هیرکانی را امکان‌پذیر کردند و می‌توانند مبنایی برای اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی باشند.

نتایج حاصل از بررسی شاخص حاصلخیزی زیستی خاک نشان داد که تودهٔ جنگلی در هر چهار شهر در شرایط حاصلخیزی متوسط قرار دارد. بیشترین مقدار در چالوس و کمترین مقدار در بهشهر مشاهده شد و مکان‌های انباشت زباله در هر چهار شهر در شرایط هشدار و پیش از استرس قرار دارند. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که حاصلخیزی زیستی خاک متأثر از فعالیت میکروبی و مادهٔ آلی خاک است که شرایط محیطی و پوشش روزمینی مقادیر این شاخص را دچار تغییرات زیادی می‌کند (Willy et al., 2019). همچنین ثابت شده است که بقایای گیاهی و پوششی روزمینی در تودهٔ جنگلی موجب افزایش زی‌توده و فعالیت میکروبی خاک و بهبود جذب کربن آلی خاک در درازمدت می‌شود (Ghimire et al., 2017). بنابراین پوشش گیاهی روزمینی در مناطق جنگلی، چرخهٔ کربن آلی خاک را بهبود می‌بخشد و سبب افزایش حاصلخیزی زیستی خاک می‌شود. در واقع، مناطق جنگلی توانایی بیشتری برای بهبود ذخیرهٔ کل کربن در خاک، با توجه به ورودی آلی و اختلال کمتر خاک دارند. از سوی دیگر، امتیاز حاصلخیزی زیستی خاک در سایت‌های دفن زباله کمتر بود. این امر به‌دلیل حذف پوشش گیاهی روزمینی است که بر فعالیت میکروبی و چرخهٔ کربن آلی خاک اثرگذار است و می‌تواند سبب کاهش حاصلخیزی بیولوژیکی خاک شود (Yaghoubi Khanghahi et al., 2020). فلزات سنگین نیز تهدید بزرگی برای موجودات زندهٔ خاک هستند و سبب کاهش تعداد و فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک می‌شوند که عملکردهای ضروری میکروبی را مختل می‌کند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش اطلاعات ارزشمندی را دربارهٔ تأثیر محل‌های دفن غیرمهندسی زباله بر شاخص‌های

زیستی خاک در چهار مکان مختلف انباشت زباله در اکوسیستم‌های جنگلی هیرکانی در شمال ایران ارائه می‌دهد. مکان‌های انباشت زباله در هر چهار شهر چالوس، نور، شیرگاه و بهشهر اثرهای معنی‌داری بر مشخصه‌های آنزیمی و میکروبی خاک دارند، اما این اثرها در بهشهر بیشتر بوده است. در بهشهر، افزون‌بر حجم بیشتر انباشت زباله، شرایط اقلیمی نیز اثر مهمی دارد. اقلیم گرم‌تر و خشک‌تر این منطقه سبب افزایش سرعت تجزیهٔ زباله و تولید بیشتر شیرابه می‌شود. همچنین رطوبت کمتر خاک، موجب کاهش ظرفیت بافری و توان خودپالایی خاک در برابر آلاینده‌ها می‌شود. این شرایط در مجموع سبب نفوذ بیشتر آلاینده‌ها و کاهش شدیدتر فعالیت‌های آنزیمی و میکروبی در خاک‌های اطراف محل دفن زباله در بهشهر نسبت به بقیهٔ مناطق شده است. شیرابهٔ زباله سبب کاهش فعالیت‌های آنزیمی و میکروبی و متعاقب آن کاهش شاخص زیستی خاک شده است که فرضیه پژوهش را تأیید می‌کند. نتایج این پژوهش محدود به سطح نظری نمی‌شود، بلکه می‌تواند مبنای اقدامات مدیریتی و اجرایی قرار گیرد. یافته‌ها نشان داد که انباشت غیراصولی زباله در جنگل‌های هیرکانی سبب کاهش معنادار شاخص‌های بیولوژیک خاک از جمله فعالیت آنزیم‌ها، زی‌توده میکروبی و شاخص حاصلخیزی زیستی می‌شود. این نتایج از منظر کاربردی اهمیت ویژه‌ای دارند، زیرا می‌توانند برای طراحی برنامه‌های پایش مستمر کیفیت خاک، اولویت‌بندی مناطق بحرانی برای مداخله و بازسازی اکوسیستم و تدوین دستورالعمل‌های بومی مدیریت پسماند در مناطق جنگلی استفاده شوند. به بیان دیگر، پژوهش حاضر شواهد علمی لازم را در اختیار تصمیم‌گیرندگان و مدیران منابع طبیعی قرار می‌دهد تا با رویکردی مبتنی بر داده‌های تجربی، از تخریب بیشتر خاک‌های جنگل‌های هیرکانی جلوگیری کنند و اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه را در دستور کار قرار دهند. در نتیجه، این تحقیق افزون‌بر کمک به شناخت بهتر فرایندهای اکولوژیک تحت تأثیر آلودگی زباله، ارزش عملیاتی زیادی برای مدیریت پایدار منابع طبیعی و محیط زیست شمال کشور دارد. نتایج به‌دست‌آمده از مکان‌های مختلف انباشت زباله در شهرهای چالوس، نور، شیرگاه و بهشهر، بینش‌های ارزشمندی را برای ارزیابی اقدامات اصولی مدیریتی از جمله بهبود سیستم‌های جمع‌آوری و تصفیهٔ شیرابه، جلوگیری از دفن غیراصولی زباله، بازسازی زیستی خاک و پایش مداوم شاخص‌های زیستی و آنزیمی خاک ارائه می‌دهد. پژوهش پیش رو بر اهمیت سامانهٔ مدیریت پسماند جامد شهری قوی در ارتقای توسعهٔ پایدار در شمال ایران و همهٔ کشورهای جهان تأکید می‌کند.

سپاسگزاری

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته شده از طرح شمارهٔ ۴۰۳۸۳۲۲ انجام شده است.

References

Alam, O., & Qiao, X. (2020). An in–depth review on municipal solid waste management, treatment and disposal in Bangladesh. *Sustainable Cities and Society*, *52*, 101775. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101775.

Alef, K., & Nannipieri, P. (Eds.). (1995). Methods in applied soil microbiology and biochemistry (pp. 1–576). London, UK: Academic Press.

Aljerf, L., & AlMasri, N. (2018). Persistence and bioaccumulation of persistent organic pollutants (POPs) in the soil and aquatic ecosystems. *Sustainability in Environment*, 3(4), 358–386. https://doi.org/10.22158/se.v3n4p358 .

Anderson, T.H., & Domsch, K.H. (1990). Application of eco–physiological quotients (qCO_2 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.

Avidano, L., Gamalero, E., Cossa, G.P., & Carraro, E. (2005). Characterization of soil health in an Italian polluted site by using microorganisms as bioindicators. *Applied Soil Ecology*, *30*(1), 21–33. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.01.003.

Borgulat, J., Łukasik, W., Borgulat, A., Nadgórska–Socha, A., & Kandziora–Ciupa, M. (2021). Influence of lead on the activity of soil microorganisms in two Beskidy landscape parks. *Environmental Monitoring and Assessment*, *193*(12), 839. https://doi.org/10.1007/s10661-021-09503-2.

Brookes, P.C., Powlson, D.S., & Jenkinson, D.S. (1982). Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, *14*, 319–329. https://doi.org/10.1016/0038-0717(82)90001-3.

Burns, R.G., DeForest, J.L., Marxsen, J., Sinsabaugh, R L., Stromberger, M.E., Wallenstein, M.D., Weintraub, M.N., & Zoppini, A. (2013). Soil enzymes in a changing environment: current knowledge and future directions. *Soil Biology and Biochemistry*, *58*, 216–234. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.009.

Cai, S., Zhou, S., Wang, Q., Cheng, J., & Zeng, B. (2024). Assessment of metal pollution and effects of physicochemical factors on soil microbial communities around a landfill. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *271*, 115968. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.115968.

Campillo–Cora, C., Rodríguez–Seijo, A., Pérez–Rodríguez, P., Fernández–Calvino, D., & Santás–Miguel, V. (2025). Effect of heavy metal pollution on soil microorganisms: Influence of soil physicochemical properties. A systematic review. *European Journal of Soil Biology*, *124*, 103706. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2024.103706.

Cheng, W., Coleman, D.C., Carroll, C.R., & Hoffman, C.A. (1993). In situ measurements of root respiration and soluble carbon concentrations in the rhizosphere. *Soil Biology and Biochemistry, 25*(9), 1189–1196. https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90214-V.

Choudhary, M., Singh, D., Parihar, M., Choudhary, K.B., Nogia, M., Samal, S.K., & Mishra, R. (2024). Impact of municipal solid waste on the environment, soil, and human health. In *Waste management for sustainable and restored agricultural soil* (pp. 33–58). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18486-4.00011-7.

Francaviglia, R., Renzi, G., Ledda, L., & Benedetti, A. (2017). Organic carbon pools and soil biological fertility are affected by land use intensity in Mediterranean ecosystems of Sardinia, Italy. *Science of the Total Environment*, *599*, 789–796. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.021.

Ghimire, R., Lamichhane, S., Acharya, B.S., Bista, P., & Sainju, U.M. (2017). Tillage, crop residue, and nutrient management effects on soil organic carbon in rice–based cropping systems: A review. *Journal of integrative agriculture*, *16*(1), 1–15. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61337-0.

Giller, K.E., Witter, E., & Mcgrath, S.P. (1998). Toxicity of heavy metals to microorganisms and microbial processes in agricultural soils: a review. *Soil biology and biochemistry*, *30*(10–11), 1389–1414. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(97)00270-8.

Golhosseini, Z., & Ghazizade, M.J. (2024). Municipal solid waste status in Iran: from generation to disposal. *Environmental Protection Research*, 16–29. https://doi.org/10.37256/epr.4120243553.

Gorobtsova, O.N., Gedgafova, F.V., Uligova, T.S., & Tembotov, R.K. (2016). A comparative assessment of the biological properties of soils in the cultural and native cenoses of the Central Caucasus (using the example of the Terskii variant of altitudinal zonality in Kabardino–Balkaria). *Eurasian Soil Science*, *49*, 89–94. https://doi.org/10.1134/S1064229316010063.

Gu, Z., Feng, K., Li, Y., & Li, Q. (2022). Microbial characteristics of the leachate contaminated soil of an informal landfill site. *Chemosphere*, *287*, 132155. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132155.

Guerrero, L. A., Maas, G. and Hogland, W. (2013). Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste management*, *33*(1), 220–232. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.008.

Hasan, H.A.H. (2000). Ureolytic microorganisms and soil fertility: A review. *Communications in soil science and plant analysis*, *31*(15–16), 2565–2589. https://doi.org/10.1080/00103620009370609.

Hinojosa, M.B., García–Ruíz, R., Vinegla, B., & Carreira, J.A. (2004). Microbiological rates and enzyme activities as indicators of functionality in soils affected by the Aznalcóllar toxic spill. *Soil Biology and Biochemistry, 36*(10), 1637–1644. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.07.006.

Homami Totmaj, L., Ramezani, E., Alizadeh, K., & Behling, H. (2021). Four millennia of vegetation and environmental history above the Hyrcanian forest, northern Iran. *Vegetation History and Archaeobotany*, 30(5), 611–621. https://doi.org/10.1007/s00334-020-00813-y.

Hosseini, S.M. (2019). Outstanding universal values of Hyrcanian Forest, the newest Iranian property, inscribed in the UNESCO's World Heritage List. *Tourism Research,* 1(3), 1–7. (In Persian)

Igalavithana, A.D., Lee, S.S., Niazi, N.K., Lee, Y.H., Kim, K.H., Park, J.H., Moon, D.H., & Ok, Y.S. (2017). Assessment of soil health in urban agriculture: soil enzymes and microbial properties. *Sustainability*, *9*(2), 310. https://doi.org/10.3390/su9020310.

IPCC. (2019). Waste Management, the Intergovernmental Panel on Climate Change. Retrieved from. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4–wg3–ch apter10–1.pdf on 2019.10.24.

Jabłońska–Trypuć, A., Wydro, U., Wołejko, E., Pietryczuk, A., Cudowski, A., Leszczyński, J., Rodziewicz, J., Janczukowicz, W., & Butarewicz, A. (2021). Potential toxicity of leachate from the municipal landfill in view of the possibility of their migration to the environment through infiltration into groundwater. Environmental Geochemistry and Health, 43(9), 3683–3698. https://doi.org/10.1007/s10653-021-00867-5.

Jadoun, P., Sharma, J., Kumar, S., Dolia, S.N., Bhatnagar, D., & Saxena, V.K. (2018). Structural and magnetic behavior of nanocrystalline Cr doped Co–Mg ferrite. *Ceramics International*, *44*(6), 6747–6753. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.01.091.

Kandziora–Ciupa, M., Nadgórska–Socha, A., & Barczyk, G. (2021). The influence of heavy metals on biological soil quality assessments in the Vaccinium myrtillus L. rhizosphere under different field conditions. *Ecotoxicology*, 30(2), 292–310. https://doi.org/10.1007/s10646-021-02345-1.

Karimi, H., Amiri, S., Huang, J., & Karimi, A. (2019). Integrating GIS and multi–criteria decision analysis for landfill site selection, case study: Javanrood County in Iran. *International journal of environmental science and technology*, 16, 7305–7318. https://doi.org/10.1007/s13762-018-2151-7.

Karimi, N., Ng, K.T.W., Richter, A., Williams, J., & Ibrahim, H. (2021). Thermal heterogeneity in the proximity of municipal solid waste landfills on forest and agricultural lands. *Journal of Environmental Management*, *287*, 112320. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112320.

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development Series. Washington, DC: World Bank. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0

Khan, S., El-Latif Hesham, A., Qiao, M., Rehman, S., & He, J.Z. (2010). Effects of Cd and Pb on soil microbial community structure and activities. *Environmental Science and Pollution Research*, 17(2), 288–296. https://doi.org/10.1007/s11356-009-0134-4 .

Kujur, M., & Kumar Patel, A. (2014). Kinetics of soil enzyme activities under different ecosystems: An index of soil quality. *Chilean journal of agricultural research*, *74*(1), 96–104. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392014000100015.

Kuwano, B.H., Nogueira, M.A., Santos, C.A., Fagotti, D.S., Santos, M.B., Lescano, L.E.A.M., Andrade, D.S., Barbosa, G.M.C., & Tavares-Filho, J. (2017). Application of landfill leachate improves

wheat nutrition and yield but has minor effects on soil properties. *Journal of Environmental Quality*, *46*(1), 153–159. https://doi.org/10.2134/jeq2016.02.0041.

Li, S., Wu, J., Huo, Y., Zhao, X., & Xue, L. (2021). Profiling multiple heavy metal contamination and bacterial communities surrounding an iron tailing pond in Northwest China. *Science of the Total Environment*, *752*, 141827. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141827.

Maphuhla, N.G., Lewu, F.B., & Oyedeji, O.O. (2021). The effects of physicochemical parameters on analysed soil enzyme activity from Alice landfill site. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(1), 221. https://doi.org/10.3390/ijerph18010221.

Martinez-Salgado, M.M., Gutiérrez-Romero, V. Jannsens, M. & Ortega-Blu, R. (2010). Biological soil quality indicators: a review (Current Research, *Technology and Microbiology and Microbial Biotechnology*, 319-328.

Moreno, J.L., Bastida, F., Ros, M., Hernández, T., & García, C. (2009). Soil organic carbon buffers heavy metal contamination on semiarid soils: Effects of different metal threshold levels on soil microbial activity. *European journal of soil biology*, *45*(3), 220–228. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2009.02.004.

Mundial, B. (2018). A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. *What a Waste, 2,* 18–20.

Nannipieri, P., Giagnoni, L., Renella, G., Puglisi, E., Ceccanti, B., Masciandaro, G., Fornasier, F.L.A.V.I.O., Moscatelli, M.C., & Marinari, S.A.R.A. (2012). Soil enzymology: classical and molecular approaches. *Biology and fertility of soils*, *48*(7), 743–762. https://doi.org/10.1007/s00374-012-0723-0.

Parkinson, D., & Coleman, D.C. (1991). Microbial communities, activity and biomass. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *34*(1–4), 3–33. https://doi.org/10.1016/0167-8809(91)90090-K.

Parkinson, D., & Coleman, D.C. (1991). Microbial communities, activity and biomass. *Agriculture, ecosystems & environment*, *34*(1–4), 3–33. https://doi.org/10.1016/0167-8809(91)90090-K.

Paz–Ferreiro, J., Gascó, G., Gutiérrez, B., & Méndez, A. (2012). Soil biochemical activities and the geometric mean of enzyme activities after application of sewage sludgeand sewage sludge biochar to soil. *Biology and fertility of soils*, *48*(5), 511–517. https://doi.org/10.1007/s00374-011-0644-3.

Pompili, L., Mellina, A.S., Benedetti, A., & Bloem, J. (2008). Microbial indicators in three agricultural soils with different management. *Soil Biology and Biochemistry*, *40*(5), 1128–1136.

Raiesi, F. (2012a). Soil properties and C dynamics in abandoned and cultivated farmlands in a semi-arid ecosystem. *Plant and Soil*, *351*, 161–175. https://doi.org/10.1007/s11104-011-0941-5.

Raiesi, F. (2012b). Land abandonment effect on N mineralization and microbial biomass N in a semi-arid calcareous soil from Iran. *Journal of Arid Environments*, *76*, 80–87. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.08.008.

Rao, M.A., Violante, A., & Gianfreda, L. (2000). Interaction of acid phosphatase with clays, organic molecules and organo–mineral complexes: kinetics and stability. *Soil Biology and Biochemistry*, *32*(7), 1007–1014. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00010-9.

Renzi, G., Canfora, L., Salvati, L., and Benedetti, A. (2017). Validation of the soil Biological Fertility Index (BFI) using a multidimensional statistical approach: A country–scale exercise. *Catena*, *149*, 294–299. https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.10.002.

Rezapour, S., Samadi, A., Kalavrouziotis, I.K., & Ghaemian, N. (2018). Impact of the uncontrolled leakage of leachate from a municipal solid waste landfill on soil in a cultivated–calcareous environment. *Waste Management*, *82*, 51–61. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.013.

Sadeghi Poor Sheijany, M., Shariati, F., & Yaghmaeian Mahabadi, N. (2025). The effects of heavy metals on enzyme activity and microbial biomass of the soil around the waste disposal site (Case study

of Saravan-Iran). Soil and Sediment Contamination: *An International Journal*, *34*(6), 1420–1442. https://doi.org/10.1080/15320383.2024.2431110.

Sagheb Talebi, K., Sajedi, T. and Pourhashemi, M. (2014). Forests of Iran: A Treasure from the Past, a Hope for the Future (No. 15325). Springer Netherlands.

Shailaja, G.S., Srinivas, N., & Rao, P.V.P. (2021). Effect of Municipal Solid Waste Leachate on Soil Enzymes. *Nature Environment and Pollution Technology*, *20*(2), 643–648. https://doi.org/10.46488/NEPT.2021.v20i02.022.

Silva, V., Mol, H.G., Zomer, P., Tienstra, M., Ritsema, C.J., & Geissen, V. (2019). Pesticide residues in European agricultural soils–A hidden reality unfolded. *Science of the Total Environment*, *653*, 1532–1545. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.441.

Sinsabaugh, R.L., Lauber, C.L., Weintraub, M.N., Ahmed, B., Allison, S.D., Crenshaw, C., Contosta, A.R., Cusack, D., Frey, S., Gallo, M.E., & Gartner, T.B. (2008). Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale. *Ecology letters*, *11*(11), 1252–1264. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01245.x.

Stasinos, S., Kostakis, M., Thomaidis, N., & Zabetakis, I. (2014). Irrigating onions and potatoes with chromium and nickel: Its effects on catalase and peroxidase activities and the cross-contamination of plants. *Water, Air, & Soil Pollution*, 225, 1–14. https://doi.org/10.1007/s11270-014-2142-3.

Steinweg, J.M., Dukes, J.S., Paul, E.A., & Wallenstein, M.D. (2013). Microbial responses to multi-factor climate change: Effects on soil enzymes. *Frontiers in Microbiology, 4*, 146. https://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00146.

Szili–Kovács, T., & Takács, T. (2024). Microbial biomass and rhizosphere soil properties in response to heavy metal–contaminated flooding. *Agriculture*, *14*(5), 756. https://doi.org/10.3390/agriculture14050756.

Teng, C., Zhou, K., Peng, C., & Chen, W. (2021). Characterization and treatment of landfill leachate: A review. *Water research*, *203*, 117525. https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117525.

Tyler, C.W. (1975). Spatial organization of binocular disparity sensitivity. *Vision Research*, *15*(5), 583–590. https://doi.org/10.1016/0042-6989(75)90306-5.

United Nations Environment Programme (UNEP). (2024). Global Waste Management Outlook 2024.

Wardle, D.A., Yeates, G.W., Watson, R.N., & Nicholson, K.S. (1995). The detritus food–web and the diversity of soil fauna as indicators of disturbance regimes in agro–ecosystems. *Plant and soil*, *170*(1), 35–43. https://doi.org/10.1007/BF02183053.

Wikurendra, E.A., Csonka, A., Nagy, I., & Nurika, G. (2024). Urbanization and Benefit of Integration Circular Economy into Waste Management in Indonesia: A Review. *Circular Economy and Sustainability,* 1–30. https://doi.org/10.1007/s43615-024-00346-w.

Willy, D.K., Muyanga, M., Mbuvi, J., & Jayne, T. (2019). The effect of land use change on soil fertility parameters in densely populated areas of Kenya. *Geoderma*, *343*, 254–262. https://doi.org/10.1007/s43615-024-00346-w.

Wydro, U., Wołejko, E., Sokołowska, G., Leszczyński, J., & Jabłońska–Trypuć, A. (2022). Investigating Landfill Leachate Influence on Soil Microbial Biodiversity and Its Cytotoxicity. *Water*, *14*(22), 3634. DOI: 10.3390/w14223634.

Yaghoubi Khanghahi, M., Cucci, G., Lacolla, G., Lanzellotti, L., & Crecchio, C. (2020). Soil fertility and bacterial community composition in a semiarid Mediterranean agricultural soil under long-term tillage management. *Soil Use and Management*, *36*(4), 604–615. https://doi.org/10.1111/sum.12645.

Zhang, X., Li, Y., Ouyang, D., Lei, J., Tan, Q., Xie, L., Li, Z., Liu, T., Xiao, Y., Farooq, T.H. & Wu, X. (2021). Systematical review of interactions between microplastics and microorganisms in the soil environment. *Journal of Hazardous Materials*, *418*, 126288. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126288.

Zhao, Q., Tang, J., Li, Z., Yang, W., & Duan, Y. (2018). The influence of soil physico–chemical properties and enzyme activities on soil quality of saline–alkali agroecosystems in Western Jilin Province, China. *Sustainability*, *10*(5), 1529. https://doi.org/10.3390/su10051529.

Zhao, X., Sun, Y., Huang, J., Wang, H., & Tang, D. (2020). Effects of soil heavy metal pollution on microbial activities and community diversity in different land use types in mining areas. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*(16), 20215–20226. https://doi.org/10.1007/s11356-020-08538-1.

Zifcakova, L. (2020). Factors affecting soil microbial processes. In *Carbon and nitrogen cycling in soil* (pp. 439–461). https://doi.org/10.1007/978-981-13-7264-3_13.

Iranian Journal of Forest
Vol. 18, No. 1, Spring 2026
pp. 87-110
Research Article

DOI: 10.22034/ijf.2025.529482.2053
CC BY 4.0

Changes in Microbial and Biological Soil Fertility under Waste Accumulation in the Hyrcanian Forests

Y. Kooch[1*], K. Haghverdi[2], A. Nouraei[3], S. Hajimirzaaghaee[3], M. Amiri[4], S. Shabani[5], and M. Zarafshar[6]

[1]Associate Prof., Dept. of Rangeland Management, Faculty of Natural Resources & Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran, Iran.
[2]Assistant Prof., Dept. of Wood and Paper Science and Technology, Ka.C., Islamic Azad University, Karaj, Iran.
[3]Ph.D. Forestry, Dept. of Sciences and Forest Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Mazandaran, Iran.
[4]Associate Prof., Dept. of Environmental Engineering, Faculty of Natural Resources, Semnan University, Semnan, Iran.
[5]Research Assistant, Research Dept. of Natural Resources, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran.
[6]Associate Prof., Faculty of Technology, Dept. of Forestry and Wood Technology, Linnaeus University, 351 95 Växjö, Sweden.

(Received: 8 July 2025; Accepted: 25 October 2025)

Abstract

Introduction: Landfilling, also known as open dumping, is among the most commonly employed methods for managing municipal solid waste globally. Currently, numerous active landfill sites in developing nations are deficient in proper leachate collection systems and sufficient treatment facilities, leading to significant environmental harm, especially in the Hyrcanian forests. Nevertheless, there has been no comparative research published regarding microbial indices and soil biological fertility between natural forest stands and landfill sites in Iran. Consequently, this study was undertaken to address this deficiency, concentrating on four cities (Behshahr, Shirgah, Noor, and Chalous), examining both adjacent forests stands (uncontaminated) and landfill sites.

Materials and Methods: In this research, soil samples were taken from four waste accumulation locations across various cities. At each location, 20 soil samples were gathered during the growing season from two depths: 0–10 cm and 10–20 cm. Additionally, control samples were obtained from nearby, uncontaminated forest areas to compare with the contaminated sites. All samples underwent chemical and biological analyses after being transported to the laboratory. To evaluate biological fertility, the soil biological fertility index was utilized as a standard measure. This index is determined based on factors such as soil organic matter, basal respiration, microbial biomass carbon, metabolic coefficient, and mineralization rate.

Results: Across all cities, soil microbial and enzymatic indices were significantly lower in landfill sites compared to the adjacent forest stands ($P < 0.01$). The results further revealed that the highest and lowest activities of urease, acid phosphatase, arylsulfatase, and invertase at both depths were observed in Chalous and Behshahr, respectively ($P < 0.01$). In addition, the assessment of the soil biological fertility index indicated that all four cities fell within the pre-stress (alarm) condition, with the lowest score (9) recorded in Behshahr.

Conclusion: The findings of this research demonstrated that waste accumulation in the Hyrcanian forests leads to a significant reduction in soil microbial indices, enzymatic activities, and biological fertility compared to uncontaminated forest soils. These changes represent a serious threat to the sustainability of forest ecosystem functions. Therefore, the results of this study can be directly applied in the sustainable management of the Hyrcanian forests. It is recommended that management actions such as preventing unregulated waste disposal, continuous monitoring of soil quality, and designing bioremediation programs in contaminated areas be considered as top priorities by natural resource and environmental managers.

Keywords: Natural forest, Non-engineered waste accumulation, Soil pollution, Soil biological fertility.

[*] Corresponding author Tel: +989112932313 Email: yahya.kooch@modares.ac.ir