FANPAYA
Knowledge Based Company
(PUBLISHERS)

Journal of Environmental Sciences Studies (JESS)
Volume 10, Number 2, Summer, (2025)

Journal Homepage: www.jess.ir
Print ISSN: 2588-6851 Online ISSN: 2645-520X

Investigating the effects of microplastics on soil microorganisms diversity, microbial respiration and chemical properties

Reihaneh Omidi Kalbibaki [1], Nasrin Gharahi[2]*, Saheb Soodaie Mashaie[3], Rasool Zamani-Ahmadmahmoodi[2],

1. Master's degree student, Department of Environmental Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord
*2. Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord
3. Assistant Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord

*Email Address: na_gharahi@yahoo.co.uk, nasrin.gharahi@nres.sku.ac.ir

Article Info

Article Type:
Research Paper

Article History:

Received Date:
2025/02/15
Revised Date:
2025/04/05
Accepted Date:
2025/04/21
Published Date:
2025/08/06

Keywords:
microplastics,
environmental pollution,
soil biodiversity,
soil chemical properties

ABSTRACT

Microplastics, particularly polyethylene terephthalate and polyester, have emerged as significant environmental pollutants, raising global concerns about their accumulation. This study aimed to investigate the effects of these microplastics on various soil properties, including acidity, cumulative respiration, microbial biomass carbon, and microbial biodiversity. To achieve this, microplastic particles smaller than 5 mm were added to soil at weight percentages of 1%, 3%, 5%, and 10%, with a 60-day incubation period for analysis. The findings indicated that the introduction of microplastics resulted in a reduction of soil respiration over time. For example, at the 1% microplastic level, soil respiration increased from 24.45 mg CO_2/kg soil/day to 38.12 mg CO_2/kg soil/day initially, but decreased at higher concentrations, with 10% polyethylene terephthalate showing a reduction to 30.45 mg CO_2/kg soil/day and polyester to 27.47 mg CO_2/kg soil/day. Additionally, microbial biomass carbon levels at the 1% microplastic concentration rose from 7.43 mg carbon/kg soil to 21.36 mg carbon/kg soil for polyethylene terephthalate and 21.97 mg carbon/kg soil for polyester. However, at higher concentrations (10%), these levels decreased to 12.82 mg carbon/kg soil for PET and 11.96 mg carbon/kg soil for polyester, indicating an inverse relationship between microplastic concentration and biomass carbon. The study also observed a decline in soil biodiversity, with a decrease at the 1% level compared to control samples, while higher levels (3%, 5%, and 10%) showed varying impacts. Overall, the research highlights the complex interactions between microplastics and soil ecosystems, suggesting potential benefits for soil quality at low concentrations but significant risks at higher levels. Further studies are essential to comprehensively understand the ecological consequences of microplastics.

Cite this article: Reihaneh Omidi, Nasrin Gharahi, Saheb Soodaie Mashaie, Rasool Zamani-Ahmadmahmoodi (2025). Investigating the effects of microplastics on soil microorganisms diversity, microbial respiration and chemical properties **,** Journal of Environmental Sciences Studies.10(2), Pages 10290 – 10300.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

One of the environmental pollutants that has become a global concern is microplastics. This study investigates the impact of two types of microplastics, polyethylene terephthalate (PET) and polyester, on soil characteristics. The objective of this research is to examine the effects of polymeric microplastic particles of polyethylene terephthalate and polyester on certain soil properties, including soil acidity, soil respiration, microbial biomass carbon, and soil microorganism biodiversity.

Materials and methods

For this purpose, microplastic particles smaller than 5 mm were added to the soil at weight percentages of 1%, 3%, 5%, and 10%. The incubation period for assessing the soil characteristics was 60 days. To prepare the soil, the samples were passed through a 2 mm sieve and placed into standardized one-liter plastic jars, which were labeled according to the respective percentages of microplastics added. The prepared samples were then allowed to rest for a duration of two months, during which temperature and humidity were maintained consistently, and parameters such as pH and electrical conductivity were measured. At the end of the resting period, the effects of different types of microplastics at specified weight percentages on the physical, chemical, and biological properties of the soil were assessed. Additionally, the impact on microorganism diversity and distribution was compared with control samples.

Results and discussion

The results indicated that the addition of microplastic particles to the soil led to a decrease in soil respiration over time. Specifically, for the treatments containing microplastic at the 1% level, soil respiration increased from 24.45 mg CO_2 per kg of soil per day to 38.12 mg CO_2 per kg of soil per day, while at higher levels, at 10% polyethylene terephthalate, it decreased to 30.45 mg CO_2 per kg of soil per day, and in the polyester treatment, it reduced to 27.47 mg CO_2 per kg of soil per day. Furthermore, at the beginning of the research, the microbial biomass carbon level in the soil at the 1% level increased from 7.43 mg carbon per kg of soil to 21.36 mg carbon per kg of soil (for the polyethylene terephthalate treatment) and 21.97 mg carbon per kg of soil (for the polyester treatment). However, over time, at higher levels (10%), the microbial biomass carbon decreased to 12.82 mg carbon per kg of soil for polyethylene terephthalate and to 11.96 mg carbon per kg of soil for polyester. This indicates an inverse relationship between microplastic concentration and biomass carbon. Additionally, over time, negative effects of microplastics on soil biodiversity became evident, with a decrease in biodiversity observed at the 1% level compared to the control treatment, while other levels (3%, 5%, and 10%) exhibited increases.

Conclusion

Overall, the findings of this study demonstrate that microplastics have complex effects on the environment and soil ecosystems, and their impact on microbial activity is intricate and dependent on concentration and type. While microplastics may present opportunities for improving soil quality, they pose serious risks at higher levels. Hence, there is a need for further studies to fully understand their consequences.

مجله مطالعات علوم محیط زیست
جلد ۱۰ ، شماره ۲
Journal Homepage:www.jess.ir
شاپای چاپی: 2588-6851 شاپای الکترونیکی: 2645-520X

FANPAYA
Knowledge Based Company
(PUBLISHERS)

بررسی اثرات میکرو پلاستیک‌ها بر تنوع زیستی ریزجانداران خاکزی، تنفس میکروبی و خصوصیات شیمیایی خاک

ریحانه امیدی کلبی بکی[۱] ، نسرین قرهی[۲*]، صاحب سودایی مشائی [۳]، رسول زمانی احمد محمودی[۲]

۱–دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد
*۲–دانشیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد
۳– استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد
*ایمیل نویسنده مسئول: na_gharahi@yahoo.co.uk, nasrin.gharahi@nres.sku.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۳/۱۱/۲۷
تاریخ بازنگری:
۱۴۰۴/۰۱/۱۶
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۰۲/۰۱
تاریخ انتشار:
۱۴۰۴/۰۵/۱۵

کلید واژه ها:
میکروپلاستیک‌ها،
آلودگی زیست محیطی،
تنوع زیستی خاک،
خصوصیات شیمیایی
خاک

چکیده

میکروپلاستیک‌ها یکی از آلاینده‌های مهم محیط زیست هستند که به یک نگرانی جهانی تبدیل شده‌اند. این تحقیق تأثیر دو نوع میکروپلاستیک، پلی‌اتیلن ترفتالات و پلی‌استر، را بر ویژگی‌های خاک بررسی کرده است. هدف مطالعه، ارزیابی اثرات این میکروپلاستیک‌ها بر اسیدیته، تنفس تجمعی خاک، کربن توده زنده میکروبی و تنوع زیستی ریزجانداران خاک بود. در این پژوهش، ذرات میکروپلاستیک با ابعاد کمتر از ۵ میلی‌متر در سطوح ۱، ۳، ۵ و ۱۰ درصد وزنی به خاک اضافه شدند و مدت زمان خوابانیدن خاک ۶۰ روز بود. نتایج نشان داد که افزودن میکروپلاستیک‌ها به خاک موجب کاهش تنفس خاک در طول زمان شد. در سطح ۱ درصد، میزان تولید دی‌اکسید کربن از ۲۴/۴۵ میلی‌گرم به ۳۸/۱۲ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک در روز افزایش یافت. در سطوح بالاتر (۳، ۵ و ۱۰ درصد)، تولید دی‌اکسید کربن کاهش یافت. در تیمار پلی‌اتیلن ترفتالات در سطح ۱۰ درصد، میزان تولید دی‌اکسید کربن به ۳۰/۴۵ میلی‌گرم رسید و در پلی‌استر به ۲۷/۴۷ میلی‌گرم کاهش یافت. در خصوص کربن توده زنده میکروبی خاک، در سطح ۱ درصد، میزان کربن از ۷/۴۳ میلی‌گرم به ۲۱/۳۶ میلی‌گرم (پلی‌اتیلن ترفتالات) و ۲۱/۹۷ میلی‌گرم (پلی‌استر) در کیلوگرم خاک افزایش یافت. اما در سطوح بالاتر (۱۰ درصد)، این میزان کاهش یافت و در سطح ۱۰ درصد، به ۱۲/۸۲ میلی‌گرم (پلی‌اتیلن ترفتالات) و ۱۱/۹۶ میلی‌گرم (پلی‌استر) رسید. در نهایت، تأثیر میکروپلاستیک‌ها بر تنوع زیستی ریزجانداران خاک نشان‌دهنده یک رابطه معکوس با غلظت میکروپلاستیک‌ها بود. در سطح ۱ درصد، کاهش تنوع زیستی نسبت به تیمار شاهد مشاهده شد، در حالی که در سطوح بالاتر افزایش تنوع مشاهده گردید. این تحقیق نشان می‌دهد که میکروپلاستیک‌ها تأثیرات پیچیده‌ای بر اکوسیستم خاک دارند و بر اساس نوع و غلظت آن‌ها، می‌توانند اثرات مثبت یا منفی بر فعالیت‌های میکروبی و ویژگی‌های خاک داشته باشند.

ناشر: انتشارات فن پایا

DOI: 10.22034/JESS.2025.504741.2351

۱-مقدمه

خاک یک سیستم پیچیده از اجزای شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی است که در تعامل مداوم با یکدیگر قرار دارند. اجزاء بیولوژیکی نقش محوری در فرایندهای حیاتی خاک ایفا می‌کنند، از جمله تشکیل هوموس، چرخش عناصر و شکل‌گیری ساختار خاک. جوامع بیولوژیکی خاک، علی‌رغم وظایف متعدد، در دو زمینه اصلی تأثیرگذار هستند: چرخش عناصر و تجزیه مواد آلی که از مهم‌ترین فرایندهای اکولوژیکی در اکوسیستم خاک محسوب می شود. تنفس یکی از مهم‌ترین فرایندهای بیولوژیکی خاک است که توسط ریز جانداران خاک صورت می‌گیرد. تنفس ریز جانداران همانند گیاهان با مصرف اکسیژن و رهاسازی دی‌اکسید کربن همراه است که یک فرایند انرژی‌زاست و طی آن ترکیبات آلی با مبادله جفت الکترون‌ها، اکسایش پیدا کرده و دی‌اکسید کربن تولید می شود. این فرایند توسط سلول‌های باکتری‌ها، قارچ‌ها، جلبک¬ها و پروتزئرهای خاک صورت می‌گیرد و در صورتی که در خاک تهویه به خوبی انجام نگیرد، بین ریز جانداران و گیاهان برای به دست آوردن اکسیژن رقابت به وجود می‌آید . تنفس و زیتوده میکروبی را می‌توان یکی از مهم‌ترین ویژگی‌ها و شاخص‌ها در امر تحول و تکامل خاک دانست که می‌تواند بر فرآیندهای مهم اکوسیستم نظیر چرخه جهانی کربن، چرخه عناصر غذایی و اصلاح زیستی اثر بگذارند. از سال ۱۹۴۰ تاکنون که تولید انبوه پلاستیک صورت گرفت، آلودگی محیط‌زیست دریایی و اکوسیستم خاکی به انواع پلاستیک‌ها به‌ویژه میکرو پلاستیک‌ها (Microplastics) به یک مشکل رو به رشد تبدیل شده است. میکرو پلاستیک‌ها ذرات پلاستیکی کوچک‌تر از ۵ میلی‌متر هستند که اثرات آن‌ها بر محیط خاک، در سال‌های اخیر توجه بیشتری را به خود جلب کرده‌اند. از عمده‌ترین منابع ورود میکرو پلاستیک‌ها به محیط می‌توان به رواناب‌های سطحی، فاضلاب‌های شهری و صنعتی، مدیریت نامناسب پسماندهای پلاستیکی، پلاستیک‌های رها شده، ذرات موجود در مواد آرایشی و بهداشتی، لندفیل¬ها و رها شدن پلاستیک‌ها به دلیل پوشش گذاری نامطلوب روزانه، ذرات اتمسفری، فیبرهای جدا شده از منسوجات در طی شستشو، سایش لاستیک‌های وسایل نقلیه و علائم خطوط جاده اشاره کرد .از اوایل سال ۲۰۲۰ تاکنون مصرف پلاستیک به دلیل بیماری کووید ۱۹ افزایش‌یافته است و این امر باعث افزایش به‌کارگیری مواد پلاستیک برای تولید و استفاده از تجهیزات و ملزومات پزشکی جهت پیشگیری و درمان این ویروس شده است. با توجه به این شرایط تولید چنین محصولاتی ضروری هستند و دولت‌ها نیز در تلاش هستند تا ذخایر این محصولات را ارتقا دهند. اما درنهایت این مواد به‌عنوان زباله‌های پلاستیکی و بعضاً به شکل ریز پلاستیک‌ها، مستقیماً به اکوسیستم‌های دریایی و زمینی تخلیه می‌شوند. آلودگی میکرو پلاستیک خاک بیشتر از محیط دریایی است . تجمع میکرو پلاستیک‌ها در خاک ممکن است بر ویژگی‌های خاک تأثیر بگذارد . در واقع، تحقیقات اخیر نشان داده است که میکرو پلاستیک‌ها می‌توانند جامعه میکروبی خاک را تغییر دهند ، که اثرات بالقوه‌ای را بر تنفس خاک و تنوع زیستی آن نشان می‌دهد . بنابراین، بررسی سلامت خاک و اثرات میکرو پلاستیک‌ها بر اکوسیستم خاک از اولویت بالایی برخوردار است. با وجود انجام پژوهش‌های زیاد در سطح جهان در زمینه اثرات آلودگی میکرو پلاستیک‌ها بر محیط‌های آبی، رسوبات و خاک تاکنون هیچ مطالعه‌ی کامل و به‌طور جزئی در مورد بررسی اثرات میکرو پلاستیک‌ها بر تنوع زیستی ریزجانداران خاک و تنفس میکروبی خاک انجام نشده است. از طرفی، با توجه به روند سریع تولید زباله‌های پلاستیکی در قرن اخیر ارزیابی اثرات میکرو پلاستیک‌ها بر تنوع زیستی ریزجانداران خاک برای حفاظت از خاک، یک امر ضروری است. بنابراین در این پژوهش، به بررسی و ارزیابی اثرات این میکروپلاستیک‌ها بر اسیدیته، تنفس تجمعی خاک، کربن توده زنده میکروبی و تنوع زیستی ریزجانداران خاک پرداخته شد.

۲-روش انجام تحقیق

در این مطالعه نوع رایج پلی‌اتیلن ترفتالات پلیمری (PET) و پلی‌استر (PS) موجود در محیط به عنوان میکرو پلاستیک با چگالی ۰/۹۲۵ گرم بر سانتی‌متر مربع برای آزمایش انتخاب و مورد استفاده قرار گرفت. برای تهیه پلی استر از ماسک بهداشتی تنفسی سه لایه از همین جنس و برای تهیه پلی اتیلن ترفتالات از بطری‌های استریل پلاستیکی استفاده و سپس به ذرات کوچک تبدیل شد. قبل از اضافه شدن به خاک، این پلیمرها آسیاب شدند و از الک ۵ میلی متری عبور داده تا اطمینان حاصل شود که ابعاد هر قطعه کمتر از ۵ میلی متر است. به منظور انجام این پژوهش در آزمایشگاه، طرح پژوهشی به صورت فاکتوریل دو عاملی در قالب طرح کاملاً تصادفی با عامل اول نوع میکروپلاستیک ۱- پلی‌اتیلن ترفتالات پلیمری (PET) و ۲- پلی‌استر (PS)، و عامل دوم سطوح مصرف این میکروپلاستیک ها در خاک گلدان شامل پنج سطح (۰، ۱، ۳، ۵ و ۱۰) درصد وزنی در سه تکرار اجرا گردید. در مجموع ۲۷ واحد آزمایشی در نظر گرفته شد. هر گلدان حاوی ۴۰۰ گرم خاک بود که میکروپلاستیک ها بر اساس تیمارها بصورت وزنی به آن اضافه گردید و رطوبت گلدان در حد ظرفیت مزرعه (۱۸ درصد) در نظر گرفته شد و مقدار آب لازم برای رسیدن خاک به رطوبت ظرفیت مزرعه به گلدان ها اضافه گردید. جهت آماده سازی خاک، ابتدا خاک نمونه‌برداری شده از منطقه دشت شهرکرد واقع در استان چهار محال و بختیاری از الک ۲ میلی متری عبور داده شد و در ظرف پلاستیک یکسان و مشخص به حجم یک لیتری و از جنس پلاستیک درب دار و نامگذاری شده به همراه درصدهای میکرو پلاستیک، افزوده شد. سپس نمونه‌های آماده شده به مدت ۲ ماه استراحت داده شد و در این مدت به‌طور منظم دما و رطوبت ثابت نگهداشته و

پارامترهایی مانند pH و EC اندازه گیری شد. پس از پایان دوره استراحت، اثر نوع میکرو پلاستیک‌ها با درصدهای وزنی مشخص بر خواص فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک و همچنین بر میزان تنوع و توزیع میکروارگانیسم‌ها و مقایسه آن‌ها با نمونه‌های شاهد مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق برای تعیین بافت خاک از روش هیدرومتری و اسیدیته خاک مورد مطالعه در سوسپانسیون ۱ به ۵ خاک به آب و با استفاده از دستگاه pH متر اندازه گیری شدند. مقادیر کربن زیست توده میکروبی (MBC) از روش تدخین–عصاره گیری ، تنفس جمعیت میکروبی خاک براساس اندازه گیری میزان دی اکسید کربن (CO_2) حاصل ازفعالیت کاتابولیکی جمعیت میکروبی و جمعیت باکتری‌های خاک با تهیه سری رقت‌های متوالی و انجام کشت میکروبی، و سپس با استفاده از جدول حداکثر تعداد ممکن (MPN) محاسبه و بر حسب تعداد باکتری در هر گرم خاک اندازه‌گیری شدند. شاخص‌های غنا و تنوع به ترتیب، توسط شاخص غنای منهینیک (رابطه ۱) و شاخص تنوع شانون–وینر (رابطه ۲) محاسبه شد.

$$\text{Minhinick} = \frac{S}{\sqrt{N}}$$ رابطه (۱)

که N تعداد افراد و S تعدا گونه‌هاست.

$$\text{Shannon} = \sum_i^S (Pi)(Log_2 Pi)$$ رابطه (۲)

که در رابطه بالا Pi نسبت افراد یا گونه i به کل گونه‌هاست.

۳- نتایج

نتایج این مطالعه نشان داد که اثر نوع میکروپلاستیک‌ها و درصدهای مختلف آنها بر تغییرات اسیدیته (pH) خاک از نظر آماری معنی‌دار نبود (جدول ۱). همچنین، مقایسه میکروپلاستیک‌ها در سطوح مختلف اختلاف معناداری را آشکار نساخت. بررسی‌ها نشان داد که میکروپلاستیک‌های PET و PS در سطوح ۵ و ۱۰ درصد، روند کاهشی در pH خاک داشتند. در تیمار ۱ درصد، میکروپلاستیک PET موجب کاهش pH خاک در مقایسه با گروه شاهد شد، در حالی که میکروپلاستیک PS سبب افزایش اسیدیته گردید. در تیمار ۳ درصد، هر دو نوع میکروپلاستیک روند افزایشی pH خاک را نشان دادند.

جدول ۱. میانگین pH خاک در هر تیمار مورد آزمایش، PET (پلی‌اتیلن ترفتالات) و PS (پلی‌استر)

pH خاک		
PS	PET	سطوح مختلف میکرو پلاستیک (درصد)
۷/۷۲±۰/۱۹aA	۷/۷۹ ±۰/۱۶aA*	۰
۷/۷۷±۰/۰۸aA	۷/۶۵ ±۰/۱۰aA	۱
۷/۸۱±۰/۰۴aA	۷/۷۰ ±۰/۰۲aA	۳
۷/۷۸±۰/۰۸aA	۷/۶۹±۰/۱۰aA	۵
۷/۷۳±۰/۱۳aA	۷/۶۶± ۰/۰۶aA	۱۰

***در هر ستون حروف کوچک مشابه نشان دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد ($p \geq 0.05$) بر اساس آزمون دانکن می‌باشد و در هر ردیف حروف بزرگ مشابه نشان دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد بین دو تیمار PET و PS می‌باشد.**

اثر هر دو میکروپلاستیک PET و PS بر تنفس پایه خاک نسبت به گروه شاهد (۰ درصد)، ابتدا روند افزایشی در سطح ۱ درصد میکروپلاستیک و سپس روند کاهشی را نشان داد. نتایج تجزیه واریانس حاکی از آن بود که اثر PET در سطوح ۱، ۳ و ۵ درصد میکروپلاستیک و همچنین اثر PS در سطح ۱ درصد میکروپلاستیک بر کاهش تنفس پایه خاک نسبت به گروه شاهد از نظر آماری معنی‌دار بود. در سایر سطوح، این اختلاف معنادار مشاهده نشد (جدول ۲). مقایسه میانگین تنفس پایه خاک بین سطوح مختلف PET و PS نشان داد که بین دو نوع میکروپلاستیک اختلاف معنی‌داری وجود ندارد.

جدول ۲. میانگین تنفس پایه خاک، در هر تیمار مورد آزمایش، PET (پلی‌اتیلن ترفتالات) و PS (پلی‌استر)

تنفس پایه خاک ($mg\ CO_2.kg^{-1}.\ day^{-1}$)		
سطوح مختلف میکرو پلاستیک	PET	PS
۰٪	۲۴/۴۵ ± ۱/۲۳ aA*	۲۴/۴۵ ± ۱/۲۳ aA
۱٪	۳۸/۱۲ ± ۶/۲۳ bA	۳۸/۱۱ ± ۴/۶۴ bA
۳٪	۳۲/۷۲ ± ۵/۲۲ bA	۳۰/۰۱ ± ۳/۶۱ aA
۵٪	۳۳/۰۸ ± ۴/۱۴ bA	۲۸/۸۷ ± ۳/۳۵ aA
۱۰٪	۳۰/۴۵ ± ۱/۹۰ aA	۲۷/۴۷ ± ۲/۸۴ aA

***در هر ستون حروف کوچک مشابه نشان دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد ($p \geq 0.05$) بر اساس آزمون دانکن می‌باشد و در هر ردیف حروف بزرگ مشابه نشان دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد بین دو تیمار PET و PS می‌باشد.**

نتایج تحقیق نشان داد که اثر نوع میکروپلاستیک‌ها و نیز اثر تعامل بین میکروپلاستیک‌ها و سطوح مختلف مصرف آن‌ها بر کاهش کربن زیست‌توده خاک از نظر آماری معنی‌دار بود، در حالی که اثر درصد سطوح میکروپلاستیک‌ها خود به تنهایی معن‌دار نبود. بررسی‌ها نشان داد که تأثیر میکروپلاستیک‌های PET و PS در سطوح ۱ درصد، ۳ درصد، ۵ درصد و ۱۰ درصد به‌طور قابل توجهی بر کاهش کربن زیست‌توده خاک نسبت به نمونه شاهد تأثیرگذار بود. همچنین، مقایسه میانگین کربن زیست‌توده خاک در سطوح مختلف PET و PS نشان داد که بین دو نوع میکروپلاستیک اختلاف معنی‌داری وجود ندارد (جدول ۳).

جدول۳. میانگین کربن زیست توده خاک، در هر تیمار مورد آزمایش.PET (پلی‌اتیلن ترفتالات) و PS (پلی‌استر)

کربن زیست توده خاک ($mg\ C.\ kg^{-1}$ soil)		
سطوح مختلف میکرو پلاستیک	PET	PS
۰٪	۷/۴۳ ± ۰/۹۹ aA*	۷/۴۳ ± ۰/۹۹ aA
۱٪	۲۱/۳۶ ± ۳/۸۴ bA	۲۱/۹۷ ±۲/۴۷ bA
۳٪	۲۰/۲۹ ± ۳/۴۷ bA	۱۶/۹۳ ± ۲/۵۴ bA
۵٪	۱۲/۲۱ ± ۰/۸۶ bA	۱۳/۱۲ ± ۰/۸۶ bA
۱۰٪	۱۲/۸۲ ± ۰/۸۷ bA	۱۱/۹۶ ± ۰/۵۱ bA

***در هر ستون حروف کوچک مشابه نشان دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد ($p \geq 0.05$) بر اساس آزمون دانکن می‌باشد و در هر ردیف حروف بزرگ مشابه نشان دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد بین دو تیمار PET و PS می‌باشد.**

تأثیر هر دو میکروپلاستیک PET و PS بر کربن آلی خاک در مقایسه با تیمار شاهد، ابتدا کاهش و سپس در سطح ۵ درصد میکروپلاستیک افزایش یافت. اما مجدداً در سطح ۱۰ درصد، کربن آلی کاهش پیدا کرد. همچنین، میکروپلاستیک PS نسبت به PET کاهش بیشتری را نشان داد (جدول ۴). در بررسی‌های انجام‌شده، اثر PET و PS در تمام سطوح میکروپلاستیک‌ها (۰ درصد، ۱ درصد، ۳ درصد، ۵ درصد و ۱۰ درصد) بر کاهش کربن آلی خاک از نظر آماری معنی‌دار نبود. مقایسه میانگین کربن آلی خاک بین سطوح مختلف PET و PS نیز نشان داد که بین دو نوع میکروپلاستیک اختلاف معنی‌داری وجود ندارد.

جدول ۴. میانگین کربن آلی خاک، در هر تیمار مورد آزمایش PET (پلی‌اتیلن ترفتالات) و PS (پلی‌استر)

کربن آلی خاک ($mg.kg^{-1}$ soil)		
PS	PET	سطوح مختلف میکرو پلاستیک
۵/۰۵ ± ۰/۷۰ aA	۵/۰۵ ± ۰/۷۰ aA*	۰٪
۴/۸۷ ± ۰/۷۱ aA	۴/۶۵ ± ۰/۳۰ aA	۱٪
۴/۷۵ ± ۰/۸۰ aA	۴/۶۱ ± ۰/۷۵ aA	۳٪
۵/۱۱ ± ۰/۷۶ aA	۵/۰۷ ± ۰/۴۹ aA	۵٪
۴/۸۱ ± ۰/۸۰ aA	۵/۰۵ ± ۰/۲۶ aA	۱۰٪

***در هر ستون حروف کوچک مشابه نشان دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد ($p \geq 0.05$) بر اساس آزمون دانکن می‌باشد و در هر ردیف حروف بزرگ مشابه نشان دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد بین دو تیمار PET و PS می‌باشد.**

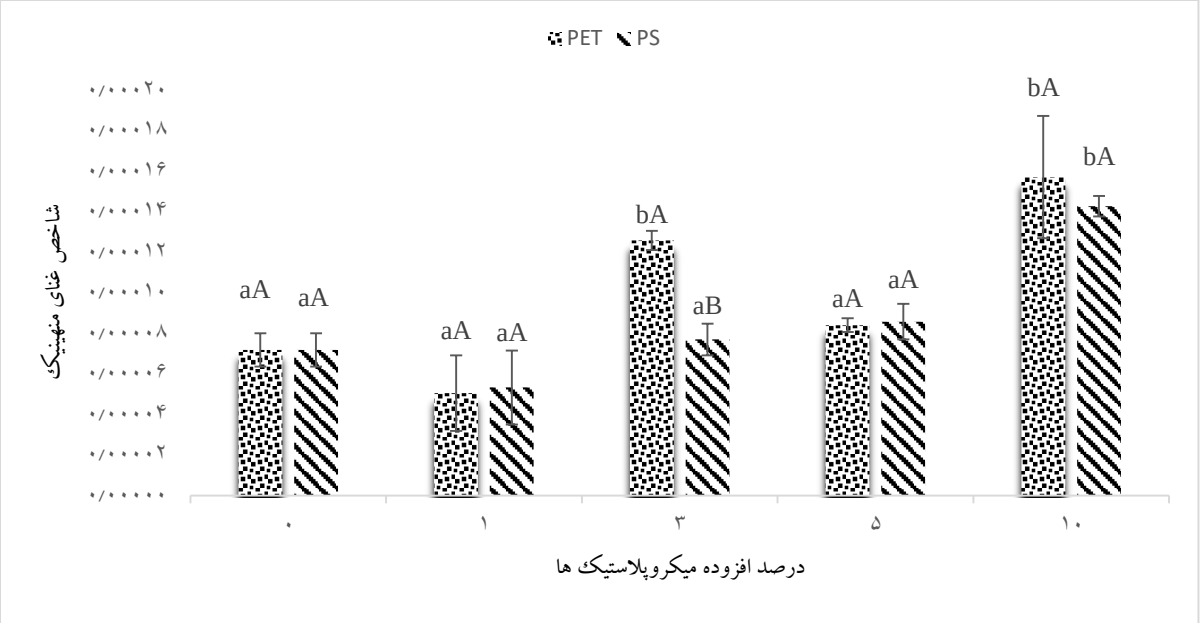
ضریب متابولیکی تحت تأثیر تیمارهای PET و PS نسبت به تیمار شاهد کاهش یافته است (جدول ۵). نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر PET در سطوح ۱ درصد، ۳ درصد و ۱۰ درصد میکرو پلاستیک بر کاهش ضریب متابولیکی خاک معنی‌دار بوده است. اما این در حالی است که اثر PS در تمام سطوح میکرو پلاستیک‌ها نسبت به نمونه شاهد معنی‌دار بود و نیز مقایسه میانگین در جدول ۵ بین سطوح مختلف PET و PS نشان داد که ضریب متابولیکی خاک در دو نوع میکرو پلاستیک تفاوت معنی‌داری نشان نداد. ضریب متابولیکی خاک تحت تأثیر تیمارهای PET و PS نسبت به تیمار شاهد کاهش یافته است (جدول ۵). نتایج تجزیه واریانس بیانگر آن است که اثر PET در سطوح ۱ درصد، ۳ درصد و ۱۰ درصد میکروپلاستیک بر کاهش ضریب متابولیکی خاک معنی‌دار بوده است. در عین حال، اثر PS در تمامی سطوح میکروپلاستیک‌ها نسبت به نمونه شاهد از نظر آماری معنی‌دار بود. علاوه بر این، مقایسه میانگین‌ها در جدول ۵ نشان داد که ضریب متابولیکی خاک بین دو نوع میکروپلاستیک PET و PS تفاوت معنی‌داری نداشت.

جدول ۵ میانگین ضریب متابولیکی خاک، در هر تیمار مورد آزمایش.PET (پلی‌اتیلن ترفتالات) و PS (پلی‌استر)

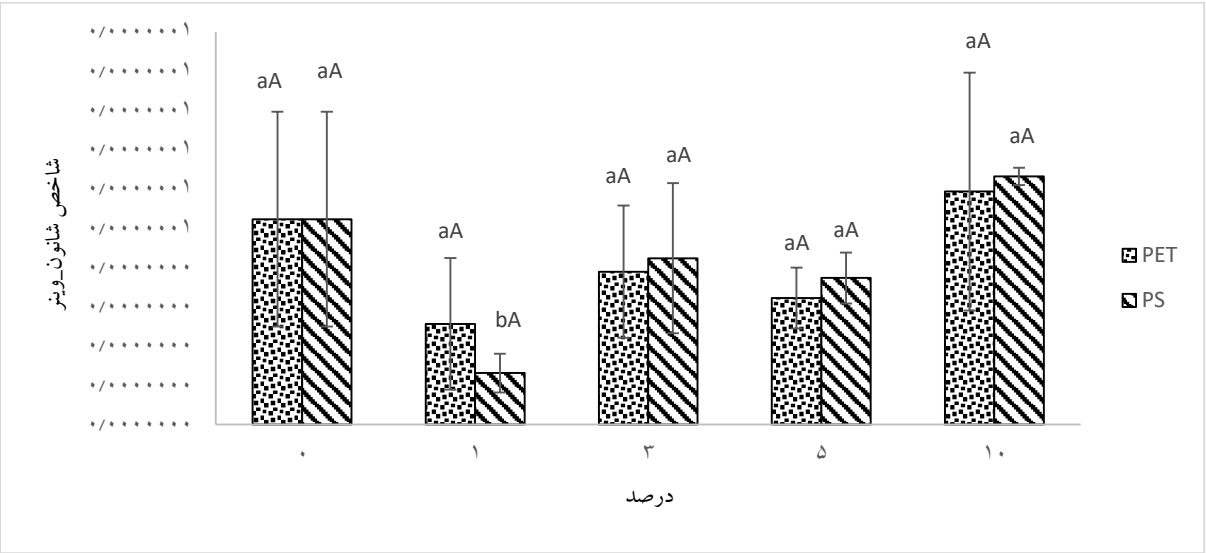
ضریب متابولیکی ($mg\ CO_2\ .g^{-1}\ MBC\ day^{-1}$)		
PS	PET	سطوح مختلف میکرو پلاستیک
۳/۳۵ ± ۰/۵۵ aA	۳/۳۵ ± ۰/۵۵ aA*	۰٪
۱/۷۵ ± ۰/۲۶ bA	۱/۷۹ ± ۰/۱۹ bA	۱٪
۱/۷۸ ± ۰/۰۷ bA	۱/۶۷ ± ۰/۵۱ bA	۳٪
۲/۲۱ ± ۰/۳۰ bA	۲/۷۰ ± ۰/۱۸ aA	۵٪
۲/۳۰ ± ۰/۳۱ bA	۲/۳۷ ± ۰/۰۱ bA	۱۰٪

***در هر ستون حروف کوچک مشابه نشان دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد ($p \geq 0.05$) بر اساس آزمون دانکن می‌باشد و در هر ردیف حروف بزرگ مشابه نشان دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد بین دو تیمار PET و PS می‌باشد.**

شاخص غنای منهینیک در شکل ۱ از مقایسه تعداد کل گونه‌ها در جمعیت تیمار شاهد با تیمارهای PET و PS نشان می‌دهد که جوامع میکروبی در تیمارهای ۱ درصد میکرو پلاستیک نسبت به تیمار شاهد کاهش و در تیمارهای ۳ درصد، ۵ درصد و ۱۰ درصد میکرو پلاستیک افزایش یافته است. همچنین در شکل ۱ تنوع گونه‌ای شاخص شانون اختلاف معنی داری را در بین تیمار شاهد با تیمارهای سطوح ۱ درصد، ۳ درصد و ۵ درصد میکرو پلاستیک نشان می‌دهد که روند کاهشی است. اما در مقایسه با تیمار با سطح ۱۰ درصد میکرو پلاستیک افزایش یافته است . شاخص غنای منهینیک در شکل ۱ به مقایسه تعداد کل گونه‌ها در جمعیت تیمار شاهد و تیمارهای PET و PS می‌پردازد. این بررسی نشان می‌دهد که جوامع میکروبی در تیمار ۱ درصد میکروپلاستیک کاهش قابل توجهی را نسبت به تیمار شاهد تجربه نموده و در تیمارهای ۳ درصد، ۵ درصد و ۱۰ درصد میکروپلاستیک، افزایش معنی‌داری را نشان می‌دهند. همچنین، در شکل ۲، تنوع گونه‌ای بر اساس شاخص شانون، اختلاف معنی‌داری را بین تیمار شاهد و تیمارهای ۱ درصد، ۳ درصد و ۵ درصد میکروپلاستیک به تصویر می‌کشد که نشان‌دهنده روند کاهشی در تنوع است. در مقابل، این تنوع در تیمار ۱۰ درصد میکروپلاستیک نسبت به تیمارهای قبلی افزایش یافته است.



شکل ۱. مقایسه اثرات میکرو پلاستیک های PET (پلی‌اتیلن ترفتالات) و PS (پلی‌استر) و تیمار شاهد بر تعداد کل گونه‌ها بر جامعه با استفاده از شاخص غنای منهینیک. حروف کوچک مشابه نشان دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد ($p \geq 0.05$) نسبت به نمونه شاهد بر اساس آزمون دانکن می‌باشد و حروف بزرگ مشابه نشان دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد بین دو تیمار PET و PS در هر تیمار جداگانه می‌باشد.



شکل ۲. مقایسه اثرات میکرو پلاستیک های PET (پلی‌اتیلن ترفتالات) و PS (پلی‌استر) و تیمار شاهد بر تنوع گونه‌ای شاخص شانون_وینر .حروف کوچک مشابه نشان دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد ($p \geq 0.05$) نسبت به شاهد بر اساس آزمون دانکن می‌باشد و حروف بزرگ مشابه نشان دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد بین دو تیمار PET و PS می‌باشد.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر (PET) در سطوح میکروپلاستیکی ۱ درصد و ۵ درصد بر کاهش شاخص غنای منهینیک معنی‌دار نبوده، در حالی که در سطوح ۳ درصد و ۱۰ درصد، این تأثیر به‌وضوح معنی‌دار بود. به همین ترتیب، تأثیر PS تنها در سطح ۱۰ درصد میکروپلاستیک معنی‌دار مشاهده شد. علاوه بر این، مقایسه میان سطوح مختلف PET و PS نشان داد که شاخص غنای منهینیک در دو نوع میکروپلاستیک به غیر از سطح ۳ درصد میکروپلاستیک، اختلاف معنی‌داری را بین آن‌ها نشان نمی‌دهد. نتایج تجزیه واریانس مربوط به تنوع گونه‌ای بر اساس شاخص شانون–وینر نیز حاکی از آن است که تأثیر PET در مقایسه با تیمار شاهد در تمامی سطوح میکروپلاستیک‌های ۱ درصد، ۳ درصد، ۵ درصد و ۱۰ درصد بر کاهش تنوع گونه‌ای این شاخص، از نظر آماری معنی‌دار نبوده است. در مقابل، تأثیر PS تنها در سطح ۱ درصد میکروپلاستیک به‌طور معنی‌داری مشاهده گردید. همچنین، تنوع گونه‌ای بر اساس شاخص شانون–وینر در دو نوع میکروپلاستیک PET و PS تفاوت معنی‌داری را نشان نداده است.

۴-نتیجه‌گیری

میکروپلاستیک‌ها به‌عنوان آلاینده‌های نوظهور، تأثیرات گسترده‌ای بر اکوسیستم‌های خاکی و آبی دارند و می‌توانند ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را تغییر دهند. تحقیقات نشان می‌دهد که این ذرات می‌توانند به کاهش pH خاک منجر شوند که به دلیل تجزیه و آزادسازی ترکیبات شیمیایی آن‌ها است. اثرات میکروپلاستیک‌ها بر pH بسته به نوع و غلظت متغیر است؛ در غلظت ۱٪، PET موجب کاهش و PS باعث افزایش pH می‌شود، در حالی که در غلظت ۳٪، هر دو نوع میکروپلاستیک روند افزایشی pH را نشان می‌دهند. حضور میکروپلاستیک‌ها همچنین می‌تواند تعادل شیمیایی خاک را تحت تأثیر قرار دهد. برخی از آنها با آزادسازی ترکیبات اسیدی، pH و ظرفیت بافری خاک را تغییر می‌دهند . در غلظت ۱٪، کربن زیست‌توده افزایش می‌یابد، اما در غلظت‌های بالاتر کاهش مشاهده می‌شود. این کاهش معنی‌دار در مقایسه با نمونه‌های شاهد از یک رابطه معکوس بین غلظت میکروپلاستیک و میزان کربن زیست‌توده حکایت دارد، اگرچه تفاوت قابل‌توجهی بین تأثیر PET و PS وجود ندارد. همچنین، میکروپلاستیک‌ها می‌توانند ترکیب آلی خاک را تحت تأثیر قرار دهند. در سطوح ۱٪ و ۳٪، کربن آلی خاک کاهش می‌یابد، در حالی که در ۵٪ افزایش و در ۱۰٪، PS کاهش ملایمی را نشان می‌دهد، اما PET تغییر قابل‌توجهی نداشت. این تغییرات ممکن است ناشی از تأثیر میکروپلاستیک‌ها بر ساختار خاک، جذب مواد مغذی و کاهش فعالیت‌های میکروبی باشد. در نهایت، این یافته‌ها ضرورت انجام تحقیقات بیشتر برای فهم بهتر اثرات میکروپلاستیک‌ها بر سلامت خاک و پایداری اکوسیستم‌ها را روشن می‌سازد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که در سطح پنج درصد میکروپلاستیک، شرایط مساعدتری برای فعالیت میکروبی ایجاد شده و به افزایش کربن آلی خاک منجر شده است. این امر احتمالاً ناشی از تأمین فضای بیشتر برای میکروارگانیسم‌ها و تأثیر میکروپلاستیک PS بر معدنی‌شدن کربن آلی است. همچنین، ذرات PS ممکن است اثرات ضد میکروبی بر برخی میکروارگانیسم‌ها، به‌ویژه قارچ‌ها، داشته باشند که موجب آسیب به دیواره سلولی آن‌ها و در نتیجه، آزادسازی کربن ذخیره‌شده می‌شود. با افزایش غلظت میکروپلاستیک‌ها به ده درصد، تغییرات محیطی شدیدتر شده و اثرات منفی بیشتری بر کربن آلی خاک مشاهده گردید. شواهد حاکی از آن است که این ذرات می‌توانند شدت و دینامیک گازهایی مانند CO_2 را در خاک تحت تأثیر قرار دهند که این تغییرات عمدتاً به اثرات آن‌ها بر ساختار خاک مرتبط است. در سطح ۱٪، افزودن PS و PET موجب افزایش فعالیت میکروبی می‌شود، ولی در غلظت‌های بالاتر، روند کاهشی مشاهده می‌شود، که این کاهش نشان‌دهنده تنش محیطی ناشی از میکروپلاستیک‌ها و تأثیر بازدارنده آن‌ها بر میکروارگانیسم‌ها است. با این حال، شواهد حاکی از آن است که برخی میکروارگانیسم‌ها ممکن است در طول زمان با این شرایط سازگار شده و از میکروپلاستیک‌ها به‌عنوان منبع کربن استفاده کنند .تحقیقات همچنین نشان داده‌اند که حضور این ذرات در خاک می‌تواند تغییرات چشمگیری در ساختار و عملکرد جوامع میکروبی ایجاد کند، که این امر بر پایداری اکوسیستم‌های خاکی تأثیر بسزایی خواهد داشت. جوامع میکروبی در سطح پایین (۱ درصد) میکرو پلاستیک در مقایسه با تیمار شاهد کاهش و در بقیه سطوح (۳ درصد، ۵ درصد و ۱۰ درصد) افزایش پیدا کردند. این کاهش ممکن است به دلیل تأثیر منفی میکرو پلاستیک‌ها بر اکوسیستم‌ها باشد. در غلظت پایین، میکرو پلاستیک‌ها می‌توانند به عنوان عوامل آلودگی مؤثر عمل کرده و بر فعالیت میکروبی تأثیر منفی بگذارند. افزایش تنوع در این غلظت‌ها (۳ درصد، ۵ درصد و ۱۰ درصد) ممکن است ناشی از این باشد که برخی از گونه‌ها به میکرو پلاستیک‌ها عادت کرده و از آن‌ها به عنوان یک منبع جدید اکولوژیکی استفاده می‌کنند زیرا در غلظت‌های بالا حجم بیشتری از میکرو پلاستیک‌ها با خاک مخلوط می‌شود. وجود میکرو پلاستیک‌ها می‌تواند منجر به ایجاد میکروزیستگاه‌های جدید شود که گونه‌های خاصی به آن‌ها جذب می‌شوند. تنوع گونه‌ای شاخص شانون در سطوح ۱ درصد، ۳ درصد و ۵ درصد در مقایسه با تیمار شاهد (۰ درصد) اختلاف معنی داری نشان داد و کاهش یافته اما در سطح ۱۰ درصد افزایش یافت. تغییرات در تنوع گونه‌ای ممکن است نشان‌دهنده وجود رقابت بین گونه‌ها باشد. در غلظت‌های بالاتر، افزایش تنوع می‌تواند نشان‌دهنده یک تعادل جدید در سیستم باشد که به ایجاد گونه‌های جدید کمک می‌کند. نتایج این تحقیق با یافته های Yu و همکاران (۲۰۲۰) همسو بود. در تحقیق Yu و همکاران (۲۰۲۰) نشان داده شد که چگونه میکروپلاستیک‌ها تأثیر مخربی بر فعالیت‌های آنزیم‌های خارج‌سلولی در خاک دارند. آزمایش‌هایی که انجام شد نشان داد که میکرو پلاستیک‌ها با تغییر خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک و جذب، فعالیت آنزیم‌ها را مهار کرده و با میکروارگانیسم‌های خاک رقابت کرده و منجر به کاهش فعالیت میکروبی و در نهایت فعالیت آنزیم خارج‌سلولی می‌شوند. نتایج نشان داد که مسیر بازدارندگی میکرو پلاستیک‌ها بر فعالیت‌های آنزیم‌های خارج‌سلولی در خاک متفاوت است.همچنین Sun و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که ورود میکروپلاستیک‌ها با ویژگی‌های مختلف می‌تواند تغییرات قابل توجهی در جامعه باکتریایی خاک ایجاد کند. عدم معنی‌داری در برخی از سطوح نشان می‌دهد که اثرات میکروپلاستیک‌ها ممکن است به سمت یک آستانه‌ای نزدیک شود که در آن تأثیرات آن‌ها تغییر می‌کند (از منفی به مثبت). می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر میکرو پلاستیک‌ها بر جوامع میکروبی پیچیده و وابسته به غلظت و نوع میکرو پلاستیک است. توانایی بعضی از گونه‌ها در سازگاری با شرایط جدید می‌تواند منجر به افزایش تنوع در سطوح بالاتر شود. به‌طور کلی، یافته‌ها می‌تواند ناشی از پیچیدگی‌های تعاملات خاک، میکروپلاستیک‌ها و سایر عوامل محیطی باشد. افزایش میکروپلاستیک‌ها ممکن است فرصت‌هایی برای بهبود کیفیت خاک ایجاد کند، اما در سطوح بالاتر می‌تواند به مشکلات جدی منجر شود. در نهایت، با توجه به محدودیت مطالعات موجود در این زمینه، به نظر می رسد که باید تحقیقات بیشتری با بررسی انواع مختلف میکروپلاستیک‌ها در خاک‌های با ویژگی‌های متفاوت انجام گیرد تا درک جامع‌تری از این پدیده حاصل شود. نتایج پژوهش نشان داد که در سطح یک درصد میکروپلاستیک، جوامع

میکروبی کاهش یافت، اما در سطوح بالاتر (سه درصد، پنج درصد و ده درصد) روند افزایشی مشاهده شد. این کاهش اولیه احتمالاً ناشی از اثرات منفی میکروپلاستیک‌ها بر اکوسیستم‌های خاکی و اختلال در فعالیت‌های میکروبی است. در مقابل، افزایش تنوع در سطوح بالاتر می‌تواند به دلیل سازگاری برخی گونه‌ها با شرایط جدید و استفاده از میکروپلاستیک‌ها به عنوان یک منبع زیستگاهی یا تغذیه‌ای باشد. شاخص تنوع شانون نیز در سطوح پایین کاهش یافت اما در ده درصد افزایش نشان داد که می‌تواند نشان‌دهنده ایجاد تعادل جدید در سیستم باشد. مطالعات پیشین، از جمله پژوهش Yu و همکاران (۲۰۲۰)، نشان داده‌اند که میکروپلاستیک‌ها با تغییر خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک، فعالیت آنزیم‌های خارج‌سلولی را مهار کرده و رقابت با میکروارگانیسم‌ها را افزایش می‌دهند که در نهایت منجر به کاهش فعالیت میکروبی می‌شود. علاوه بر این، Sun و همکاران (۲۰۲۲) تأثیر میکروپلاستیک‌ها بر تغییرات جامعه باکتریایی را گزارش کرده‌اند. به‌طور کلی، تأثیرات میکروپلاستیک‌ها بر خاک و زیستگاه‌های میکروبی دوگانه و وابسته به غلظت و نوع میکروپلاستیک است. در برخی موارد، می‌توانند باعث تخریب اکوسیستم‌های خاکی شوند، در حالی که در برخی شرایط، ممکن است فضاهای جدیدی برای رشد میکروارگانیسم‌ها ایجاد کنند. از این رو، تحقیقات بیشتری برای درک بهتر این پدیده ضروری است .بررسی اثرات طولانی‌مدت میکروپلاستیک‌ها بر خاک، تعامل آن‌ها با سایر آلاینده‌ها و توسعه راهکارهای کاهش اثرات منفی آن‌ها از جمله موضوعاتی است که باید در پژوهش‌های آینده مورد توجه قرار گیرد.

منابع

- 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), pp.251-255.
- Austin, A.T., et al. 2004. Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems, Oecologia, 141, pp.221-235.
- Blöcker, L., et al. 2020. Living in the plastic age-Different short-term microbial response to microplastics addition to arable soils with contrasting soil organic matter content and farm management legacy, Environmental Pollution, 267, p.115468.
- Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1, Agronomy journal, 54(5), pp.464-465.
- Chen, X., et al. 2023. Presence of different microplastics promotes greenhouse gas emissions and alters the microbial community composition of farmland soil, Science of the Total Environment, 879, p.162967.
- de Souza Machado, A.A., et al. 2018. Impacts of microplastics on the soil biophysical environment, Environmental science & technology, 52(17), pp.9656-9665.
- Ding, L., et al. 2022. The effects of microplastics on soil ecosystem: A review, Current Opinion in Environmental Science & Health, 26, p.100344.
- Fei, Y., et al. 2020. Response of soil enzyme activities and bacterial communities to the accumulation of microplastics in an acid cropped soil, Science of the Total Environment, 707, p.135634.
- Gao, H., et al. 2022. Macro-and/or microplastics as an emerging threat effect crop growth and soil health, Resources, Conservation and Recycling, 186, p.106549.
- Gharahi, N., Zamani-Ahmadmahmoodi, R. 2022. Effect of plastic pollution in soil properties and growth of grass species in semi-arid regions: a laboratory experiment, Environmental Science and Pollution Research, 29(39), pp.59118-59126.
- Hazelton P., Murphy B. 2007. Interpreting soil test results, CSIRO publishing, 169.
- Hillel, D. 1980. Environmental soil physics, Academic press, 281- 284.
- Horton, A.A., et al. 2017. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. Science of the total environment, 586, pp.127-141.
- Huang, J., et al. 2021. Microplastic pollution in soils and groundwater: Characteristics, analytical methods and impacts, Chemical Engineering Journal, 425, p.131870.
- Huang, Y., et al. 2019. LDPE microplastic films alter microbial community composition and enzymatic activities in soil, Environmental Pollution, 254, p.112983.
- Joergensen, R.G. 1995. The fumigation incubation method. Methods in applied soil microbiology and biochemistry, Academic Press Limited, London, Great Britain, pp.376-381.
- Kucey, R. 1983. Phosphate-solubilizing bacteria and fungi in various cultivated and virgin Alberta soils, Canadian Journal of Soil Science, 63(4), pp.671-678.

- Landi, L., et al. 2000. Influence of cadmium on the metabolic quotient, L-: D-glutamic acid respiration ratio and enzyme activity: microbial biomass ratio under laboratory conditions, Biology and fertility of soils, 32, pp.8-16.
- Lian, Y., et al. 2022. Effects of polyethylene and polylactic acid microplastics on plant growth and bacterial community in the soil. Journal of Hazardous Materials, 435, p.129057.
- Liu, H., et al. 2017. Response of soil dissolved organic matter to microplastic addition in Chinese loess soil, Chemosphere, 185, pp.907-917.
- Lozano, Y. M., et al. 2021b. Effects of microplastics and drought on soil ecosystem functions and multifunctionality, Journal of Applied Ecology, 58(5), 988-996.
- Lozano, Y.M., et al. 2021a. Microplastic shape, polymer type, and concentration affect soil properties and plant biomass, Frontiers in plant science, 12, p.616645.
- Mai L. Bao L.J. Wong C.S. and Zeng E.Y. (2018). Microplastics in the terrestrial environment. In Microplastic contamination in aquatic environments, pp. 365-378.
- Rezania, S., et al. 2018. Microplastics pollution in different aquatic environments and biota: A review of recent studies, Marine pollution bulletin, 133, pp.191-208.
- Rillig, M.C. 2012. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil, Environmental Science & Technology, 46(12) , 6453-6454.
- Rillig, M.C., Lehmann, A. 2020. Microplastic in terrestrial ecosystems, Science, 368(6498), pp.1430-1431.
- Sun, Y., et al. 2022. Effects of microplastics on soil microbiome: The impacts of polymer type, shape, and concentration. Science of the Total Environment, 806, p.150516.
- Thukral, A.K. 2017. A review on measurement of Alpha diversity in biology, Agricultural Research Journal, 54(1).
- Wang, C., et al. 2021. Environmental source, fate, and toxicity of microplastics, Journal of hazardous materials, 407, p.124357.
- Wollum, A.G. 1982. Cultural methods for soil microorganisms, Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties, 9, pp.781-802.
- Yi, M., et al. 2021. The effects of three different microplastics on enzyme activities and microbial communities in soil, Water Environment Research, 93(1), pp.24-32.
- Yu, H., et al. 2020. Inhibitory effect of microplastics on soil extracellular enzymatic activities by changing soil properties and direct adsorption: An investigation at the aggregate-fraction level, Environmental Pollution, 267, p.115544.
- Zhao, T., et al. 2021. Microplastics increase soil pH and decrease microbial activities as a function of microplastic shape, polymer type, and exposure time, Frontiers in Environmental Science, 9, p.675803.
- Ziajahromi, S., et al. 2017. Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: development of a new approach to sample wastewater-based microplastics, Water research, 112, pp.93-99.
- غازان شاهی، ج.، ۱۳۸۵. آنالیز خاک و گیاه، انتشارات آییژ. ۲۷۴ صفحه.