



The Impact of Microplastic on Selected Soil Physical and Chemical Properties

Ahmad Samadi¹ Kazem Nosrati^{2✉} | Reza Dehbandi³

1. Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail:

samadi82a61@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: k_nosrati@sbu.ac.ir

3. Department of Chemical Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran. and School of Geography, Earth and Environmental Sciences, University of Birmingham, Edgbaston, B15 2TT Birmingham, United Kingdom. E-mail: Rezadehbandi65@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Dec. 18, 2024

Revised: Feb. 15, 2025

Accepted: Feb. 22, 2025

Published online: June. 2025

Keywords:

Chemical Properties,
Microplastic,
Physical Properties,
Soil.

ABSTRACT

The use of plastics has become highly prevalent in modern human life, making their elimination nearly impossible. Plastics break down into smaller microplastics particles due to environmental factors, eventually entering the soil. Microplastics alter the physical, chemical and biological properties of soil. In this study, the effects of polyethylene terephthalate (PET) microplastics on certain physicochemical properties of soil were investigated in rangeland and agricultural lands within the Nahrman watershed. Experimental plots were constructed, and PET microplastics smaller than 500 micrometers were added to the soil. Three stages of irrigation and tillage were conducted in agricultural plots, while three rainfall events and three tillage stages were performed in rangeland plots. Parameters such as clay, silt, and sand percentages, pH, sodium (Na), potassium (K), electrical conductivity (EC), and organic carbon (OC) were measured before and after the addition of microplastic particles and throughout the irrigation, rainfall, and surface tillage processes. In the rangeland plots, after the introduction of microplastics into the soil, all chemical properties examined except for pH showed non-significant increases. Clay content increased by 2%, and silt content increased by 0.19%, while sand content decreased by 6.04%. In agricultural plots, pH (t -value = 4.3, p = 0.002) and K (t -value = 5.9, p = 0.001) increased significantly, whereas Na and OC showed non-significant increases, and EC decreased. The percentage of soil clay (t -value = 3.99, p = 0.003) decreased significantly, while silt (t -value = 2.33, p = 0.042) and sand (t -value = 4.93, p = 0.001) percentages increased significantly. Due to the flood irrigation method used in agricultural plots, most changes in soil texture were attributed to surface erosion, and the addition of PET microplastics did not result in significant alterations in soil texture. This was further supported by the lack of significant changes in soil texture in rangeland plots. Therefore, the effects of microplastics on soil texture require more extensive research. However, the introduction of microplastics into soil affects its chemical properties over time, with the extent of these effects varying based on land use type and specific soil conditions.

Cite this article: Samadi, A., Nosrati, K., & Dehbandi, R. (2025) The impact of microplastics on certain physical and chemical properties of soil, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (4), 919-934. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.387179.669855>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.387179.669855>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction:

Plastics are present in the environment in three primary size categories: macro, meso, and micro. Microplastics (MPs) primarily enter the environment through two pathways: as primary MPs, which are intentionally manufactured for use in products such as cosmetics, and as secondary MPs, which result from the degradation of larger plastic items due to environmental factors like ultraviolet (UV) radiation, water, and wind erosion. Beyond aquatic environments such as oceans and lakes, soil serves as a significant repository for MPs. The composition and properties of microplastics can vary widely, influencing their interaction with the soil environment. The accumulation of MPs in soil has substantial implications for its physical and chemical characteristics, impacting soil quality and functioning either directly or indirectly. The investigation of the effect of MPs on the physicochemical characteristics of soil is primarily conducted in laboratory and pilot-scale environments, with few studies performed at the field or landscape scale. Additionally, there is limited research on this issue across different land uses. Polyethylene terephthalate (PET) is one of the materials used in the production of agricultural irrigation pipes and other products such as Disposable plastic containers. As a result, this MPs has entered agricultural soils and bareland. In this research, we examine the effects of PET on several key soil characteristics. This study investigates the impact of PET MPs on some soil properties, including Percentage of clay, silt and sand, OC, Na, K, EC, and pH, within two rangeland uses and agricultural land.

Data and research method:

Two types of land, rangelands and agricultural, were selected for the study, and a pair of test plots were established in each land type. A total of 3000 grams of MPs was evenly distributed across the surface of one of two available plots in both the rangelands and agricultural areas. The MPs were thoroughly mixed with the soil to a depth of 0–10 cm using a manual chaser. One plot in each land type (rangelands and agricultural) was designated as a control plot, with no MPs. After the establishment of the rangeland's plots, 12 samples of 200 grams were collected from the surface of the plots, at a depth of 0–10 cm. The agricultural plots were irrigated biweekly for a period of 8 weeks. Upon completion of the irrigation period, 12 samples, each weighing 200 grams, were taken from the surface of the plots at a depth of 0–10 cm. In the laboratory, the concentrations of K, Na, EC, OC, and soil pH were analyzed. Additionally, soil texture was determined using the hydrometric method, and the percentages of clay, silt, and sand in the soil were calculated. A t-test was used to check the correlation and relationships between the investigated parameters.

Results:

In the rangeland's plots, after the test period concluded, the average levels of Na, K, OC, and EC of the soil increased, while the soil acidity slightly decreased. These changes were not statistically significant. Additionally, the clay content increased slightly, whereas the amount of silt did not change but the amount of sand decreased slightly. In the agricultural plots, the levels of Na and OC in the soil increased, while the EC decreased. However, these changes were not statistically significant. On the other hand, both pH and K showed a significant increase. The percentage of clay decreased significantly, while the percentage of sand and silt increased significantly. This is despite the fact that no significant changes were observed in the physical and chemical properties of the soil in the control plots on range land plots, despite the processes of plowing and irrigation. Therefore, the type of land use, soil type, and the duration of the presence of microplastics in the soil are effective in the extent of the effect of microplastics on the physicochemical properties of the soil.

Conclusion:

Based on the findings from previous and current research on the effects of various microplastics on soil physicochemical properties, it is recommended that further studies be conducted to examine the impact of commonly used microplastics, such as light and heavy polyethylene and biodegradable microplastics such as polylactic acid, on essential soil elements like phosphorus and nitrogen. These investigations should be carried out in multiple agricultural fields subjected to different irrigation methods, to better understand the comprehensive influence of microplastics on soil quality under varied management practices.

Author Contributions

Conceptualization, K.N. and R.D.; methodology, K.N. and A.S.; software, A.S.; validation, K.N., A.S. and R.D.; formal analysis, A.S.; investigation, K.N., A.S. and R.D.; resources, K.N.; data curation, A.S.; writing—original draft preparation, A.S.; writing—review and editing, K.N. and A.S.; visualization, K.N., A.S. and R.D.; supervision, K.N.; project administration, K.N.; funding acquisition, K.N. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Acknowledgments

We acknowledge the support of Grant number 600.871 funded by the research council of Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

تأثیر میکروپلاستیک بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

احمد صمدی^۱ | کاظم نصرتی^۲ | رضا دهنبدی^۳^۱. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران. رایانامه: samadi82a61@gmail.com^۲. نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران. رایانامه: k_nosrati@sbu.ac.ir^۳. گروه مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت مازندران، بهشهر، ایران. و پژوهشگر، دانشکده جغرافیا، علوم زمین و محیط‌زیست، دانشگاه بیرمنگهام، انگلستان.رایانامه: Rezadehbandi65@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	استفاده از پلاستیک‌ها امروزه در زندگی بشر بسیار رواج داشته و کنار گذاشتن آن امکان پذیر نیست. میکروپلاستیک‌ها به دو نوع اولیه و ثانویه تقسیم می‌شوند. میکروپلاستیک‌های اولیه در ساخت محصولات مثل لوازم بهداشتی و آرایشی استفاده می‌شوند و میکروپلاستیک‌های ثانویه در اثر عوامل محیطی از پلاستیک‌های درشت به ذرات ریزتر میکروپلاستیک تبدیل شده و وارد خاک می‌شوند. میکروپلاستیک‌ها ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را تغییر می‌دهند. در این مطالعه، تأثیر میکروپلاستیک پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) بر برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک در زمین‌های مرتعی و کشاورزی در حوضه آبریز نهر میان بررسی شد. پس از احداث کرت‌های آزمایشی و افزودن میکروپلاستیک PET با اندازه‌های کوچک‌تر از ۵۰۰ میکرومتر به خاک، سه مرحله آبیاری و شخم سطحی در کرت‌های کشاورزی انجام شد، در حالی که در کرت‌های مرتعی سه رخداد بارش و سه مرحله شخم سطحی صورت گرفت. ویژگی‌هایی مانند درصد رس، سیلت و ماسه، pH، سدیم (Na)، پتاسیم (K)، هدایت الکتریکی (EC) و کربن آلی (OC) متغیرهایی بودند که پیش از افزودن ذرات میکروپلاستیک و پس از اضافه کردن آن‌ها در خاک و طی مراحل آبیاری، بارش و شخم سطحی، در خاک اندازه‌گیری شدند. در کرت‌های مرتعی، پس از وارد کردن میکروپلاستیک‌ها به خاک، تمامی ویژگی‌های شیمیایی مورد بررسی، به جز pH، افزایش غیرمعنی‌دار داشتند. میزان رس ۲ درصد و سیلت ۱۹/۰ درصد افزایش یافتند، در حالی که ماسه ۴/۰۶ درصد کاهش یافت. در کرت‌های کشاورزی، pH (t-value = 4.3, p = 0.002) و K (t-value = 5.9, p = 0.001) به‌طور معنی‌دار افزایش یافتند، در حالی که Na و OC افزایش غیرمعنی‌دار داشتند و EC کاهش یافت. درصد رس خاک (t-value = 3.99, p = 0.003) به صورت معنی‌دار کاهش یافت، در حالی که درصد سیلت (t-value = 2.33, p = 0.042) و ماسه خاک (t-value = 4.93, p = 0.001) به‌طور معنی‌دار افزایش یافتند. با توجه به آبیاری غرقابی در کرت‌های کشاورزی بیشتر تغییرات در بافت خاک مربوط به فرسایش سطحی است و ورود میکروپلاستیک PET تغییر ملموسی در بافت خاک نداشت زیرا در کرت‌های مرتعی تغییرات معنی‌داری در بافت خاک رخ نداد. بنابراین تأثیر میکروپلاستیک‌ها بر بافت خاک نیاز به تحقیقات وسیع‌تری دارد. اما ورود میکروپلاستیک‌ها در خاک در طول زمان بر ویژگی‌های شیمیایی آن تأثیر می‌گذارد. این تأثیرات بسته به نوع کاربری اراضی، نوع خاک و مدت زمان حضور میکروپلاستیک‌ها در خاک متفاوت است.

واژه‌های کلیدی:

خاک،
ویژگی‌های فیزیکی،
ویژگی‌های شیمیایی،
میکروپلاستیک.

استناد: صمدی، احمد؛ نصرتی، کاظم؛ و دهنبدی، رضا (۱۴۰۴). تأثیر میکروپلاستیک بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶

(۴)، ۹۳۴-۹۱۹. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.387179.669855>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.387179.669855>

مقدمه

در سال‌های اخیر، میکروپلاستیک‌ها به عنوان یک آلاینده نوظهور به دلیل اثرات نامطلوب بالقوه‌شان بر موجودات زنده، به طور گسترده در سطح جهانی مورد توجه قرار گرفته است (Chen et al., 2014; Machado et al., 2018). توجه به آلودگی میکروپلاستیک‌ها در محیط به تدریج از محیط دریایی به محیط خشکی جلب شده است (Rillig & Lehmann 2020; Machado et al., 2018). خاک یک مخزن بزرگ است که میکروپلاستیک‌ها را از طریق منابع مختلف، مانند آبیاری با استفاده از فاضلاب، استفاده از جامدات زیستی، نهشت جوی و استفاده از لجن فاضلاب دریافت می‌کند (Wang et al., 2020). بنابراین، خاک می‌تواند به عنوان یک مخزن موقت یا دائمی میکروپلاستیک‌ها عمل کند. خاک‌ها بزرگ‌ترین منبع جهانی میکروپلاستیک‌ها هستند و برخلاف ذرات خاک که حاوی مواد معدنی و اجزای آلی هستند، میکروپلاستیک‌ها ترکیبات و خواص متفاوتی دارند و می‌توانند خواص خاک را مستقیم یا غیر مستقیم تغییر دهند و در نهایت از طریق تغییر ویژگی‌های ساختاری بر آبشویی مواد در خاک تأثیر بگذارد (Zhao et al., 2021). خاک می‌تواند انتقال میکروپلاستیک‌ها به محیط دریایی را به تأخیر بیندازد یا مانع آن شود (Chia et al., 2022).

میکروپلاستیک‌ها به دلیل ظرفیت جذب بالای خود، ممکن است رفتارهای جذب یا دفع و در دسترس بودن مواد مغذی یا آلاینده‌ها را در اشکال آلی خاص تغییر دهند و در نتیجه حاصلخیزی خاک و سمیت آلاینده در خاک را تغییر دهند (Wang et al., 2021; Yan et al., 2020; Zhang et al., 2020). میکروپلاستیک‌ها تأثیر منفی قابل توجهی بر چگالی ظاهری خاک و پایداری خاک‌دانه‌ها دارد که نشان می‌دهد آن‌ها ممکن است به یکپارچگی ساختار خاک آسیب برسانند (Mondol et al., 2024). سطح تغییرات قابل توجه در زیست توده ریشه گیاه و فسفاتاز^۱ خاک، تأثیر بالقوه میکروپلاستیک‌ها را بر چرخه عناصر غذایی و ژئوشیمیایی خاک نشان می‌دهد (Qiu et al., 2022). pH خاک، یک پارامتر کلیدی خاک است که می‌تواند طیف وسیعی از فرآیندهای میکروبی را تحت تأثیر قرار دهد (Higashida & Takao., 1986). با وجود این، تحقیقاتی در مورد اثرات پلی اتیلن (PE^۲) بر pH خاک انجام شده است. به عنوان مثال، ذرات پلاستیکی با جنس پلی اتیلن با چگالی کم (LDPE^۳) ممکن است pH خاک را افزایش دهند (Qiu et al., 2022). در حالی که پلی اتیلن با چگالی بالا، ممکن است تأثیر مخالف داشته باشد (Boots et al., 2019). با این حال، یک مطالعه توسط Wang et al., (2020) پیشنهاد کرد که پلی اتیلن با چگالی بالا (HDPE^۴) همچنین ممکن است باعث افزایش pH خاک شود. pH خاک در تیمارهای با میکروپلاستیک با اندازه ۱۳۰ میکرومتر به طور قابل توجهی افزایش یافت (Wang et al., 2020). Yang et al., (2021) به بررسی تأثیر میکروپلاستیک‌های پلی اتیلن سنگین و نانو ذرات روی بر خاک پرداختند، آن‌ها دریافتند که این دو pH خاک را افزایش می‌دهند. میکروپلاستیک‌ها همچنین می‌توانند محتویات کربن آلی خاک و پتاسیم موجود در خاک را افزایش دهند (Yan et al., 2023). ذرات میکروپلاستیک میزان معدنی شدن کربن آلی و تنفس تجمعی خاک را افزایش می‌دهند، اما بر میزان فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اثر بازدارنده دارد (تفویضی، محمدبابا اکبری و دلاور، ۱۴۰۰). نیتروژن و پتاسیم خواص فیزیکی و شیمیایی خاصی دارند و به دلیل تحرک زیاد پس از ورود به خاک به راحتی با جریان آب به عمق خاک نفوذ می‌کنند (Ascott et al., 2017). این فرآیند عمده‌تاً مربوط به تخلخل خاک، بار موجود در ذرات خاک و جذب سطحی خاک است. هنگامی که فضای منافذ خاک کوچک باشند، نیتروژن و پتاسیم عمده‌تاً با جریان نفوذ به سمت پایین آبشویی کرده و سرعت شستشوی مواد غذایی آهسته می‌شود (Bouma., 1991). با این حال، زمانی که فضای منافذ خاک بزرگ باشد، به ویژه در حضور جریان ترجیحی، سرعت شسته شدن نیتروژن و پتاسیم به سمت پایین در خاک سریع‌تر می‌شود (Bouma., 1991). روابط پیچیده بین کربن آلی خاک، ذرات معدنی ریز و جمعیت میکروبی به شدت به تولید و پایداری خاک وابسته است (Zhang et al., 2019). در یک مطالعه، پس از ۳۰ روز انکوباسیون، محققان دریافتند که میکروپلاستیک‌های با غلظت بالا تأثیر قابل توجهی بر سطوح کربن آلی محلول در خاک (DOC)، نیتروژن آلی (DON)، فسفر آلی (DOP) و سولفات آلی (DOS) دارند (Shi et al., 2023). پلی اتیلن با تأثیر بر توزیع آب از طریق خاصیت آبریزی، ویژگی‌های خاک را تغییر می‌دهد (Zhang et al., 2024). تفویضی و همکاران (۱۴۰۲) در یک تحقیق با ۳ غلظت متفاوت از میکروپلاستیک پلی اتیلن در خاک و ۶ دوره آنکوباسیون متفاوت نشان دادند که ذرات میکروپلاستیک غلظت قابل تبادل سدیم، پتاسیم و کلسیم را کاهش داد. بیشترین کاهش مربوط به سطح ۴ درصد میکروپلاستیک بود. غلظت سدیم، پتاسیم و کلسیم قابل تبادل در مقایسه با خاک شاهد به ترتیب ۷/۲، ۵/۷ و ۲/۶ درصد کاهش یافت. با افزایش تولید پلاستیک در سراسر جهان، پیش بینی می‌شود که تأثیر و شدت فعلی آلودگی

1. Phosphate rock

2. Polyethylene

3. Low-density polyethylene

4. High-Density Polyethylene

میکروپلاستیک‌های خاک بر کیفیت و سلامت خاک برای مدت بسیار طولانی باقی بماند. در نتیجه، تحقیقات بیشتری برای ارزیابی اثرات آلودگی میکروپلاستیک بر سایر شاخص‌های مطالعه نشده سلامت خاک مورد نیاز است (Chia et al., 2022).

میکروپلاستیک‌ها می‌توانند بر ویژگی‌های فیزیکی خاک نیز تأثیر بگذارند، که اثرات آن به طور گسترده در رابطه با ویژگی‌های خاک، نوع، شکل، اندازه و غلظت میکروپلاستیک متفاوت است (Boots et al., 2019; Lozano et al., 2021; Machado et al., 2018). اکثر میکروپلاستیک‌ها سطح آبگریز دارند که ممکن است ظرفیت نگهداری آب، انتقال و در دسترس بودن در خاک را تغییر دهند (Machado et al., 2019; Boots et al., 2019). اثرات میکروپلاستیک‌ها بر جوامع میکروبی، ظرفیت نگهداری آب، و رابطه عملکردی بین فعالیت میکروبی و دانه‌های تثبیت شده با آب در طول یک آزمایش پنج هفته ای کشت خاک را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده از این پژوهش، دریافتند که انواع مختلف میکروپلاستیک اثرات متفاوتی بر ویژگی‌های زیستی و غیر زیستی خاک دارند. به عنوان مثال، نشان داده شده است که پلی اتیلن به طور قابل توجهی مقدار خاک دانه‌های پایدار در آب را افزایش می‌دهد و پلی استر PES^۱ مقدار آن‌ها را کاهش می‌دهد. Lozano et al., (2021) و Liang et al., (2021) گزارش کردند که میکروپلاستیک با کاهش محتوای خاک دانه درشت^۲ (< ۰.۲۵ میلی‌متر) موجب تخریب ساختار خاک شده و در نتیجه بر آبشویی مواد در خاک تأثیر می‌گذارند. Machado et al., (2019) در مطالعه خود دریافتند که میکروپلاستیک‌ها چگالی ظاهری خاک را کاهش، چرخه آب خاک را افزایش و فرایندهای شستشوی نیتروژن را با افزایش منافذ موئینگی و غیر موئینگی خاک و تخلخل تهویه‌ای تسریع کردند. برخلاف نتایج Machado et al., (2019) و Zhang et al., (2019) در مطالعه خود دریافتند که میکروپلاستیک‌ها می‌توانند حجم منافذ خاک را کاهش دهند یا به دلیل آبگریزی آن، خاک را قادر می‌سازند تا دفع آب شدیدی داشته باشد و در نتیجه ظرفیت ذخیره‌سازی آب حفره‌ای کاهش یابد و در نهایت بر شستشوی مواد مغذی خاک تأثیر بگذارند که ممکن است به دلیل تأثیر ناشی از غلظت‌های مختلف میکروپلاستیک باشد. علاوه بر این، میکروپلاستیک‌ها بر فعالیت آنزیم خاک نیز تأثیر می‌گذارند و با تغییر ترکیب میکروارگانیسم‌های متصل به سطح میکروپلاستیک به دلیل مساحت سطح بزرگ و ماهیت نسبتاً بی اثر، بر آبشویی کربن، نیتروژن، فسفر و پتاسیم در خاک تأثیر می‌گذارد (Machado et al., 2018; Rillig et al., 2018; Rillig et al., 2019; Yu et al., 2020).

Zhao et al., (2021) تأثیر الیاف، فیلم‌ها، فوم‌ها و قطعات خرد شده، میکروپلاستیک‌های پلی آمید (PA^۳)، پلی کربنات (PC^۴)، پلی اتیلن (PE)، پلی استر (PES)، پلی اتیلن ترفتالات (PET^۵)، پلی پروپیلن (PP^۶)، پلی استایرن (PS^۷)، و پلی یورتان (PU^۸) را بر pH، تنفس و چهار فعالیت آنزیمی خاک شنی مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که میکروپلاستیک‌ها می‌توانند بر pH خاک، تنفس خاک و فعالیت‌های آنزیمی تأثیر بگذارند، که این اثرات بسته به شکل میکروپلاستیک، نوع پلیمر و با زمان انکوباسیون تغییر می‌کنند. Wang et al., (2022) در تحقیقی مروری به بررسی اثرات میکروپلاستیک‌ها بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک پرداختند و دریافتند که در اکثر موارد، میکروپلاستیک‌ها می‌توانند ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبیولوژیکی خاک را تغییر دهند، اما اثرات آن‌ها متفاوت بوده و به نوع پلیمر، شکل میکروپلاستیک، مقدار آن در خاک و اندازه میکروپلاستیک‌ها بستگی دارد.

بررسی اثر میکروپلاستیک‌ها بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک عمدتاً در محیط آزمایشگاهی و پایلوت انجام شده و مطالعات انجام شده در مقیاس میدانی و مزرعه بسیار نادر است. همچنین کمتر مطالعه‌ای به این اثر در کاربری‌ها و شرایط محیطی مختلف پرداخته است. همچنین تحقیقات انجام شده در این زمینه نتایج متناقضی در مورد تغییرات بافت، کربن آلی و عناصر pH، EC، Na موجود در خاک در اثر وجود میکروپلاستیک‌های مختلف حاصل کرده است. در این تحقیق اثر میکروپلاستیک‌های پلی اتیلن ترفتالات PET بر تغییرات بافت خاک، کربن آلی (OC)، سدیم (Na)، هدایت الکتریکی (EC) و pH موجود در خاک در دو کاربری کشاورزی و مرتع در مقیاس میدانی و در یک حوضه آبریز کوچک در مرکز ایران بررسی شده است. این تحقیق گامی مهم در جهت پر کردن خلاء موجود در مطالعات میدانی برداشته است. نتایج این پژوهش می‌تواند درک ما را از تأثیرات واقعی میکروپلاستیک‌ها بر خاک در شرایط طبیعی افزایش دهد و به ارائه راهکارهای مدیریتی مناسب برای کاهش اثرات منفی این آلاینده‌ها در اکوسیستم‌های خاکی کمک کند. همچنین، این مطالعه با بررسی

1 Polyester

2 Macro grain

3 Polyamide

4 Polycarbonate

5 Polyethylene terephthalate

6 Polypropylene

7 Polypropylene

8 Polyurethane

همزمان چندین پارامتر خاک، امکان مقایسه و ارزیابی جامع‌تری از تأثیرات میکروپلاستیک‌ها فراهم می‌کند که می‌تواند در سیاست‌گذاری‌های زیست‌محیطی و کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد.

پیشینه تحقیق

Liu et al., (2017) آزمایش خاک را در یک محفظه تحت کنترل آب و هوا با سه سطح میکروپلاستیک اضافه شده به خاک لس جمع آوری شده از زمین‌های لس در چین در بازه زمانی ۷ تا ۳۰ روز انجام دادند: ۰٪ (شاهد)، ۷٪ (نمونه اول) و ۲۸٪ (نمونه دوم). با اضافه کردن میکروپلاستیک پلی پروپیلن^۱ (pp) با اندازه‌های کوچک‌تر از ۱۳۰ میکرومتر به خاک لس در طول ۳۰ روز دریافتند که غلظت بالای میکروپلاستیک پلی پروپیلن باعث افزایش مواد آلی محلول (نیتروژن، فسفر و کربن آلی) موجود در خاک می‌شود. آن‌ها همچنین دریافتند که اضافه کردن میکروپلاستیک پلی پروپیلن می‌تواند ۲۸٪ تولید مواد آلی خاک را افزایش دهد.

Qian et al., (2018) خاک آلوده به فیلم پلاستیکی باقیمانده از عملیات کشاورزی و خاک غیرآلوده در زمین‌های کشاورزی سین کیانگ را برای مطالعه انتخاب کردند. آن‌ها دریافتند که وجود فیلم‌های پلاستیکی در خاک باعث کاهش نیتروژن معدنی می‌شود. نتایج حاضر نشان داد که قرار گرفتن در معرض طولانی مدت ضایعات فیلم پلاستیکی (بیش از ۱۰ سال) در زمین‌های کشاورزی به طور قابل توجهی حاصلخیزی خاک را کاهش داده و ساختار جامعه میکروبی را تغییر می‌دهد.

Wang et al., (2020) اثر ذرات ۱۰۰ تا ۱۵۴ میکرومتر پلی اتیلن و پلی لاکتیک اسید^۲ (PLA) را بر PH خاک در یک خاک لومی - شنی بررسی کردند. نتایج نشان داد که پلی اتیلن باعث کاهش PH و PLA باعث افزایش PH خاک شد.

Yang et al., (2021) میکروپلاستیک پلی اتیلن سنگین با اندازه‌های ۱۰۰ تا ۱۵۴ میکرومتر را به خاک لومی شنی اضافه کردند و مشاهده کردند که PH خاک بعد ورود میکروپلاستیک‌ها افزایش یافت. به طور کلی، یافته‌ها حاکی از افزایش آلودگی توسط میکروپلاستیک‌ها بود که می‌تواند تأثیرات اکولوژیکی عمیقی بر شرایط گیاه، کیفیت گیاه، و ترکیب و تنوع جامعه میکروبی خاک داشته باشد.

Lozano et al., (2021) الیاف میکروپلاستیک (وجود میکروپلاستیک، عدم وجود میکروپلاستیک) و شرایط آب- خاک (آبیاری خوب، خاک خشک) را در یک طرح کاملاً آزمایشگاهی آزمایش کردند. با اضافه کردن میکروپلاستیک‌های فیبر به طول ۱/۲۸ میلیمتر به خاک لومی- شنی در شرایط فرسایش در محیط آزمایشگاه مشاهده کردند که ۲۸٪ مواد آلی خاک بیشتر در خاک حفظ شدند. میکروپلاستیک‌ها تجمع خاک را تا ۱۸ درصد، pH خاک را تا ۰.۴٪ و حفظ مواد مغذی را تا ۷۰٪ با کاهش آشوبی مواد مغذی افزایش داد. Wang et al., (2022) اثر میکروپلاستیک‌های پلی اتیلن سبک کوچکتر از ۲۵۰ میکرومتر را بر روی میزان آلودگی خاک لومی- شنی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که میزان ۱۰٪ وزنی اضافه کردن میکروپلاستیک پلی اتیلن سبک به خاک جذب آلودگی توسط خاک را به طور کلی کاهش می‌دهد.

Feng et al., (2022) اثر میکروپلاستیک‌های پلی استر، پلی آمید، پلی اتیلن با اندازه‌های ۳۹ تا ۸۰ میکرومتر را بر مواد آلی خاک لومی- شنی آزمایش کردند. نتایج نشان داد که میکروپلاستیک‌های پلی اتیلن، پلی استر و پلی آمید باعث افزایش مواد آلی خاک شد. به طور کلی، میکروپلاستیک‌ها به ویژه در دوز ۲٪ غنا و تنوع جوامع باکتریایی را کاهش دادند و ترکیب جامعه میکروبی را تغییر داده و همچنین باعث غنی‌سازی ویژه گونه‌های خاص شد. به طور کلی، اثرها وابسته به نوع و مقدار میکروپلاستیک‌ها بود.

Shi et al., (2023) در مطالعه ای، اثرات میکروپلاستیک‌های پلی اتیلن و پلی اسید لاکتیک (زیست تخریب پذیر) را بر روی فرایندهای موثر بر مواد آلی خاک از طریق انکوباسیون کانی‌سازی بررسی کردند. یک سنسور نوری مسطح سنجده اکسیژن برای تشخیص رفتار زمانی اکسیژن محلول در طول انکوباسیون، به منظور تعیین ناهمگنی اکسیژن در مقیاس میکرو ناشی از میکروپلاستیک‌ها استفاده شد. علاوه بر این، تغییرات در مواد آلی محلول در خاک با استفاده از ترکیبی از روش‌های طیف‌سنجی و طیف‌سنجی جرمی با وضوح فوق‌العاده بالا مورد ارزیابی قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد که میکروپلاستیک‌ها ممکن است کانی‌سازی مواد آلی خاک را با اصلاح ریزمحیط‌های اکسیژن، غلظت مواد آلی محلول در خاک و قابلیت انتقال الکترون در مواد آلی محلول در خاک تسهیل کنند.

تفویضی و همکاران (۱۴۰۲) در آزمایشی به بررسی تغییرات عناصر سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم تحت تأثیر ذرات میکروپلاستیک

1 Polypropylene

2 Polylactic acid

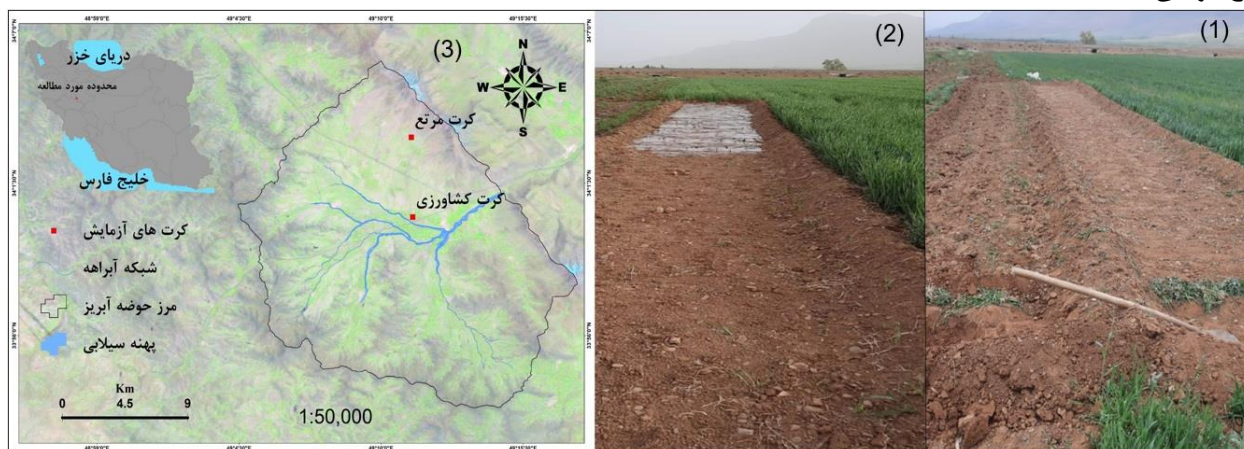
پلی اتیلن سبک در خاک پرداختند. آزمایش به صورت فاکتوریل بر صورت کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا شد. آزمایش شامل مقدار ذرات میکروپلاستیک (۰، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی-وزنی) و دوره انکوباسیون (۳، ۱۷، ۳۱، ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰ روز) بود. ذرات میکروپلاستیک غلظت قابل تبادل سدیم، پتاسیم و کلسیم را کاهش داد. بیشترین کاهش مربوط به سطح ۴ درصد میکروپلاستیک بود. غلظت سدیم، پتاسیم و کلسیم قابل تبادل در مقایسه با خاک شاهد به ترتیب ۷/۲، ۵/۷ و ۲/۶ درصد کاهش یافت.

Zhang et al., (2024) به منظور بررسی اثرات میکروپلاستیک‌ها بر خواص فیزیکی خاک، مقاومت الکتریکی و هدایت حرارتی خاک های حاوی پلی اتیلن با رطوبت مختلف را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان داد که پلی اتیلن دو اثر بر مقاومت الکتریکی خاک دارد: یکی این که ذرات پلاستیک مقاومت الکتریکی را افزایش می دهند و دیگر اینکه میدان الکترواستاتیکی که توسط ذرات پلاستیک حمل می شود مقاومت الکتریکی را کاهش می دهد. همچنین پلی اتیلن با تأثیر بر توزیع آب به علت سطح آبگریزش، خواص خاک را تغییر می دهد. مقدار آب به تدریج تا ۱۰٪ افزایش می یابد، ناحیه رسانایی مایع در داخل خاک افزایش می یابد و توانایی خاک برای هدایت الکتریسیته و گرما بیشتر می شود.

روش شناسی تحقیق

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش حوضه آبریز نهرمیان که یکی از زیرحوضه های منتهی به دشت سازند در ۵۰ کیلومتری شهر اراک است، می باشد. ارتفاعات این منطقه از لحاظ سنگ شناسی شامل سنگ های دگرگونی (اسلیت و فیلیت)، سنگ آهک و در برخی مناطق سنگ های با جنس کنگلومرا است. مساحت حوضه آبریز نهرمیان ۲۸۶/۸۲ کیلومتر مربع می باشد. این حوضه بین ۳۴/۰۹۷ تا ۳۳/۸۸ عرض شمالی و ۴۹/۷۰ تا ۴۹/۲۳ طول شرقی قرار گرفته است. بلندترین ارتفاع حوضه آبریز نهرمیان ۳۱۹۰ متر در ارتفاعات جنوب شرقی و پائین ترین ارتفاع منطقه ۱۸۸۸ متر در خروجی حوضه قرار دارد (اختلاف ارتفاع حدود ۱۳۰۲ متر). متوسط بارندگی در این حوضه ۴۷۲ میلیمتر در سال بوده که بخش زیادی از آن به شکل برف می باشد. وسعت اراضی کشاورزی دیم و آبی در این حوضه ۱۵۰۳۴ هکتار و مراتع حدود ۱۲۵۳۴ هکتار می باشند. مهمترین عناصر ژئومورفولوژیکی در منطقه: اشکال دامنه ای، آبرفت رودخانه ها، تراست های دریاچه ای، خندق ها و واریزه های پایکوهی می باشد. کاربری غالب منطقه شامل مراتع و زمین های کشاورزی است. در زمین های کشاورزی میکروپلاستیک ها از طریق کودهای کمپوست، کودهای حیوانی، نوارهای تیپ مورد استفاده در آبیاری قطره ای، لوله کشی زمین های کشاورزی جهت اجرای آبیاری بارانی، مالچ های به کار رفته در کاشت صیفی جات و سایش تایر ادوات کشاورزی وارد خاک می شوند. زمین های مرتع پخش زباله های مناطق مسکونی از مراکز تخلیه و دفن آن ها توسط باد و همچنین رسوب میکروپلاستیک ها از جو مهم ترین منابع آلودگی خاک هستند.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه. (۱) احداث کرت های زوجی آزمایش و استاندارد. (۲) آبیاری و شخم کرت ها. (۳) موقعیت حوضه آبریز نهرمیان در ایران و موقعیت کرت آزمایش مرتع در شمال و کرت آزمایش کشاورزی در مرکز حوضه آبریز نهرمیان

بررسی میدانی و احداث کرت های آزمایش و استاندارد

در بازه زمانی فروردین ماه ۱۴۰۰ تا فروردین ماه ۱۴۰۱ برای بررسی تاثیر ذرات میکروپلاستیک بر عناصر خاک بخشی از زمین های

کشاورزی در مرکز حوضه آبریز نهرمیان (روستای بهمنی) و بخشی از زمین‌های مرتع در شمال حوضه آبریز نهرمیان (روستای ظهیرآباد) به عنوان محل آزمایش انتخاب شد. سپس منطقه تعیین شده برای استقرار کرت‌های آزمایشی با استفاده از گاوآهن قالبی ۳ نقطه‌ای متصل به تراکتور تا عمق ۳۰ سانتی‌متری شخم زده شد. زمین شخم زده شده برای فرآیند ساخت کرت آماده شد. در هر کدام از این زمین‌ها یک کرت آزمایش (اضافه شدن میکروپلاستیک) و یک کرت استاندارد (بدون میکروپلاستیک) احداث شد. اندازه کرت انتخاب شده برای این مطالعه مطابق با ابعاد استاندارد مورد استفاده در چارچوب معادله جهانی از دست دادن خاک (USLE) که توسط Wischmeier و Smith (1978) و Renard (1997) با ابعاد ۲۲,۱ متر طول و ۲ متر عرض توضیح داده شده است، انتخاب شد. بعد از آماده‌سازی کرت‌ها، از سطح آن‌ها ۱۲ نمونه خاک به مقدار ۲۰۰ گرم در کیسه‌های آلومینیومی برداشت شد. برای بررسی میزان آلودگی خاک به میکروپلاستیک‌ها قبل از شروع آزمایش، این نمونه‌ها به آزمایشگاه انتقال داده شد. بعد از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، رسوبات ذخیره شده، در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد به مدت ۴۸ تا ۷۲ ساعت در آون خشک شده و به وزن ثابت رسیدند. بعد از خشک کردن نمونه‌ها ابتدا ذرات بزرگ شامل سنگ‌ها، چوب، شن و بقایای بزرگ پلاستیکی نیز جدا شد. نمونه‌ها از الک ۵۰۰ میکرومتر عبور داده شد. مقدار ۵۰ گرم از هر نمونه را به یک بشر ۵۰۰ میلی‌لیتری که در آن محلول هیدروژن پراکسید ۳۰٪ به اندازه کافی و متناسب با وزن رسوب جداسازی شده وجود دارد برای هضم مواد آلی از رسوبات انتقال داده شد. به مواد باقی‌مانده داخل بشر محلول کلرید روی اضافه شد. رسوبات بعد از هم زدن محلول به مدت ۵ دقیقه روی شیکر تخت کاملاً مخلوط شدند. محلول روئین بعد از ۲۴ ساعت داخل فالكون ریخته و به مدت ۱۵ دقیقه با دور ۳۵۰۰ سانتریفیوژ شد. محلول روئین داخل فالكون با کمک ست فیلتراسیون و فیلتر غشائی جانسون (گرید ۳۰۴) فیلتر شد. این عمل (هم زدن محلول کلرید روی، سانتریفیوژ کردن و فیلتر کردن) برای هر نمونه سه بار تکرار شد. مواد روی فیلتر به ظروف پتری (پلیت) انتقال داده شد. میکروپلاستیک‌های موجود در ظروف پتری با استفاده از میکروسکوپ نوری استریو (25x) با دقت مشاهده و شناسایی شدند. جهت شمارش دقیق و کاهش خطا، در زیر ظروف پتری یک صفحه مشبک شماره‌گذاری شده چسبانده شد تا شمارش تمام میکروپلاستیک‌ها در هر شبکه به صورت تجمعی انجام شود. تعداد میکروپلاستیک‌های موجود در خاک سطح کرت‌ها به طور میانگین ۵ عدد در ۵۰ گرم خاک بود که بیشتر از نوع فیبر به رنگ شفاف و تعداد کمی قطعه به رنگ‌های سیاه، قرمز و آبی کم‌رنگ بودند. در ابتدا، برای تولید میکروپلاستیک، مقدار ۳ کیلوگرم دانه (bead) پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) به رنگ آبی و با چگالی ۱/۶۷ گرم در متر مکعب از شرکت پتروشیمی پلیمرپرشین خریداری و به روش فریز درایر^۱ منجمد و به وسیله آسیاب مکانیکی ضربه‌ای به مدت ۵ دقیقه آسیاب شدند. در مرحله بعد، میکروپلاستیک‌های پودر شده را از الک ۵۰۰ میکرومتر عبور دادیم. در کرت آزمایش در هر دو کاربری میکروپلاستیک‌های کوچکتر از ۵۰۰ میکرومتر معادل ۰/۴ درصد وزنی خاک اضافه و در عمق ۰ تا ۱۰ سانتیمتری خاک به وسیله چیزر دستی کاملاً مخلوط شدند. یکی از کرت‌ها در هر دو کاربری به عنوان قطعه استاندارد بدون اضافه کردن میکروپلاستیک رها شد. بعد از شخم زدن اولیه و مخلوط کردن خاک سطح کرت‌ها با میکروپلاستیک‌ها تا عمق ۱۰ سانتیمتری، سطح کرت‌ها با یک وزنه استوانه‌ای ۳۰ کیلوگرمی به ابعاد ۱ متر در ۲۰ سانتیمتر محکم و فشرده شد تا در اثر فرسایش بادی و عوامل محیطی دیگر، میکروپلاستیک‌ها از سطح کرت خارج و پراکنده نشوند.

نمونه‌برداری

بعد از احداث کرت‌های مرتع از سطح کرت‌ها ۱۲ نمونه ۲۰۰ گرمی از عمق ۰ تا ۱۰ سانتیمتری برداشت، بسته بندی و شماره گذاری شد. بعد از اضافه کردن میکروپلاستیک PET در سطح کرت آزمایش، کرت‌های مرتع به مدت ۷ ماه از مهرماه سال ۱۴۰۰ تا پایان فروردین ماه سال ۱۴۰۱ به حال خود رها شدند و بعد از هر بارندگی سطح کرت‌ها با چیزر دستی شخم سطحی زده شد تا از رشد گیاهان جلوگیری شود. بعد از اتمام دوره ۷ ماهه، مجدداً ۱۲ نمونه ۲۰۰ گرمی از عمق ۰ تا ۱۰ سانتیمتری سطح کرت‌ها در فروردین ماه ۱۴۰۱ برداشت، بسته بندی و شماره گذاری شد.

از سطح کرت‌های کشاورزی هم ۱۲ نمونه ۲۰۰ گرمی از عمق ۰ تا ۱۰ سانتیمتری برداشت، بسته بندی و شماره‌گذاری شد. بعد از اضافه کردن میکروپلاستیک، کرت‌های کشاورزی نیز به مدت ۸ هفته (اوائل اردیبهشت سال ۱۴۰۰ تا اواخر فروردین همان سال) هر دو هفته یک‌بار به روش غرقابی (آبیاری سطحی)، آبیاری (هر بار با دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه به مدت ۵ دقیقه) شدند و یک هفته بعد از اتمام دوره ۸ هفته‌ای، از سطح کرت‌ها ۱۲ نمونه ۲۰۰ گرمی از عمق ۰ تا ۱۰ سانتیمتری سطح کرت‌ها برداشت، بسته‌بندی و شماره‌گذاری شد. در طول دوره آزمایشی، سطوح کرت‌ها به طور دقیق بعد از هر آبیاری و گاورو شدن زمین با چیزر دستی شخم سطحی زده شد و تمام گیاهان

نوظهور به صورت دستی حذف شدند تا از رشد آن‌ها جلوگیری شود. بعد از اتمام دوره ۸ هفته ای آبیاری و شخم زدن، مجدداً ۱۲ نمونه ۲۰۰ گرمی از عمق ۰ تا ۱۰ سانتیمتری سطح کرت‌ها برداشت، بسته بندی و شماره گذاری شد.

تجزیه آزمایشگاهی نمونه‌ها

بعد از انتقال نمونه‌های برداشت شده به آزمایشگاه، ابتدا برای حذف ذرات چوب و قطعات درشت، نمونه‌های خاک از الک ۲ میلیمتر عبور داده شدند. نمونه‌های الک شده به وسیله آون در دمای ۶۰ درجه به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. از هر نمونه ۲۰ گرم خاک برداشت شد و عصاره اشباع خاک برای انجام مراحل بعد استخراج شد. برای محاسبه پتاسیم (K) و سدیم (Na) مقدار این عناصر در عصاره اشباع خاک (سوسپانسیون ۱:۱ آب / خاک)، با استفاده از روش فلیم فومتر (Carter & Gregorich., 2007) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی (EC) و PH خاک در عصاره اشباع خاک، از دستگاه EC متر و pH متر استفاده شد (Nosrati, 2013). هم چنین مقدار کربن آلی (OC) هر نمونه به روش والکلی بلک اندازه‌گیری شد (Bagherifam et al, 2021; Walkley & Black., 1934). به منظور تعیین بافت خاک ۵۰ گرم از هر نمونه را وزن کرده و پس از پراکندگی خاکدانه‌ها توسط سدیم هگزامتاسفات، فرآیند تعیین بافت خاک به روش هیدرومتری (Kroetsch and Wang., 2008) انجام شد. درصد رس، سیلت و ماسه و پارامترهای EC, K, Na, PH و OC، در نمونه‌هایی که قبل و بعد از اضافه شدن میکروپلاستیک PET به خاک برداشت شدند، محاسبه شد.

برای تحلیل‌های آماری و استخراج روابط معنی‌دار بین متغیرهای مورد بررسی در نرم افزار SPSS از آزمون T-test متغیرهای مستقل استفاده شد. به منظور رسم نمودارها از نرم افزار Origin 2018 استفاده شد.

یافته‌های پژوهش و بحث

تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تحت تاثیر میکروپلاستیک‌ها در کرت‌های مرتع

قبل از ورود میکروپلاستیک PET و شروع بارش‌ها میانگین مقدار EC از ۷۲۰/۸ به ۸۹۴/۱ $\mu\text{S}/\text{cm}^1$ ، Na از ۳۴/۳۵ به ۵۲/۴ ppm^2 ، K از ۹/۸۲ به ۱۱/۰۶ ppm و OC از ۱۳/۷۲ به ۱۴/۶ g/kg^2 بعد از ورود میکروپلاستیک PET و اتمام بارش‌ها افزایش یافت. اما مقدار pH از ۸/۰۹ به ۸/۰۴ کاهش یافت. بر اساس نتایج به دست آمده از مقایسه عناصر خاک قبل و بعد از ورود میکروپلاستیک PET در کرت مرتع توسط آزمون T-test، مشخص شد که در کرت آزمایش همه پارامترهای اندازه‌گیری شده در خاک شامل: OC, Na, K و EC به جز pH بعد از وارد کردن میکروپلاستیک PET افزایش داشته‌اند اما معنی‌دار نبود (شکل ۲). در مقابل در کرت استاندارد (فاقد میکروپلاستیک) تمام عناصر خاک بعد از سه مرحله بارش، کاهش داشته‌اند (جدول ۱) که این کاهش را می‌توان اثر باران بر خاک دانست. بنابراین با توجه به اینکه اثر باران بر خاک در کرت آزمایش هم وجود داشته است اما تغییرات عناصر خاک در کرت آزمایش افزایشی بوده و علت آن می‌تواند ناشی از اضافه کردن میکروپلاستیک PET در خاک باشد. Yan et al., (2023) با اضافه کردن میکروپلاستیک پلی اتیلن با اندازه‌های مختلف و مقدار متفاوت به خاک، اثر آن را بر شستشوی نیتروژن و پتاسیم محلول از خاک را آزمایش کردند. آن‌ها دریافتند که درصد و اندازه میکروپلاستیک موجود در خاک بر شستشوی نیتروژن و پتاسیم از خاک و کنترل شستشوی آن‌ها موثر است. Zhang et al., (2024) در آزمایشی به بررسی تاثیر میکروپلاستیک پلی اتیلن بر هدایت الکتریکی و گرمایی خاک پرداختند و دریافتند که پلی اتیلن ویژگی‌های خاک را با تاثیر بر توزیع آب از طریق خاصیت آب‌گریزی تغییر می‌دهد.

خاک کرت‌های مرتع از نوع سیلتی - رسی - لومی بود. قبل از ورود میکروپلاستیک PET و شروع بارش‌ها میانگین درصد رس ۴۱/۹۱ بود که به ۴۲/۷۵ درصد بعد از ورود میکروپلاستیک PET و اتمام بارش‌ها بعد از دوره ۷ ماهه افزایش و میانگین درصد سیلت از ۴۵/۶۶ به ۴۵/۷۵ درصد افزایش و میانگین درصد ماسه از ۱۲/۴۱ به ۱۱/۶۶ درصد کاهش یافتند. مقدار رس ۲ درصد و سیلت ۰/۵۳ درصد افزایش، اما ماسه ۶/۰۴ درصد کاهش داشتند (جدول ۱). بر اساس نتایج محاسبه شده به وسیله آزمون T-test بافت خاک تغییرات معنی‌دار نداشت (شکل ۲).

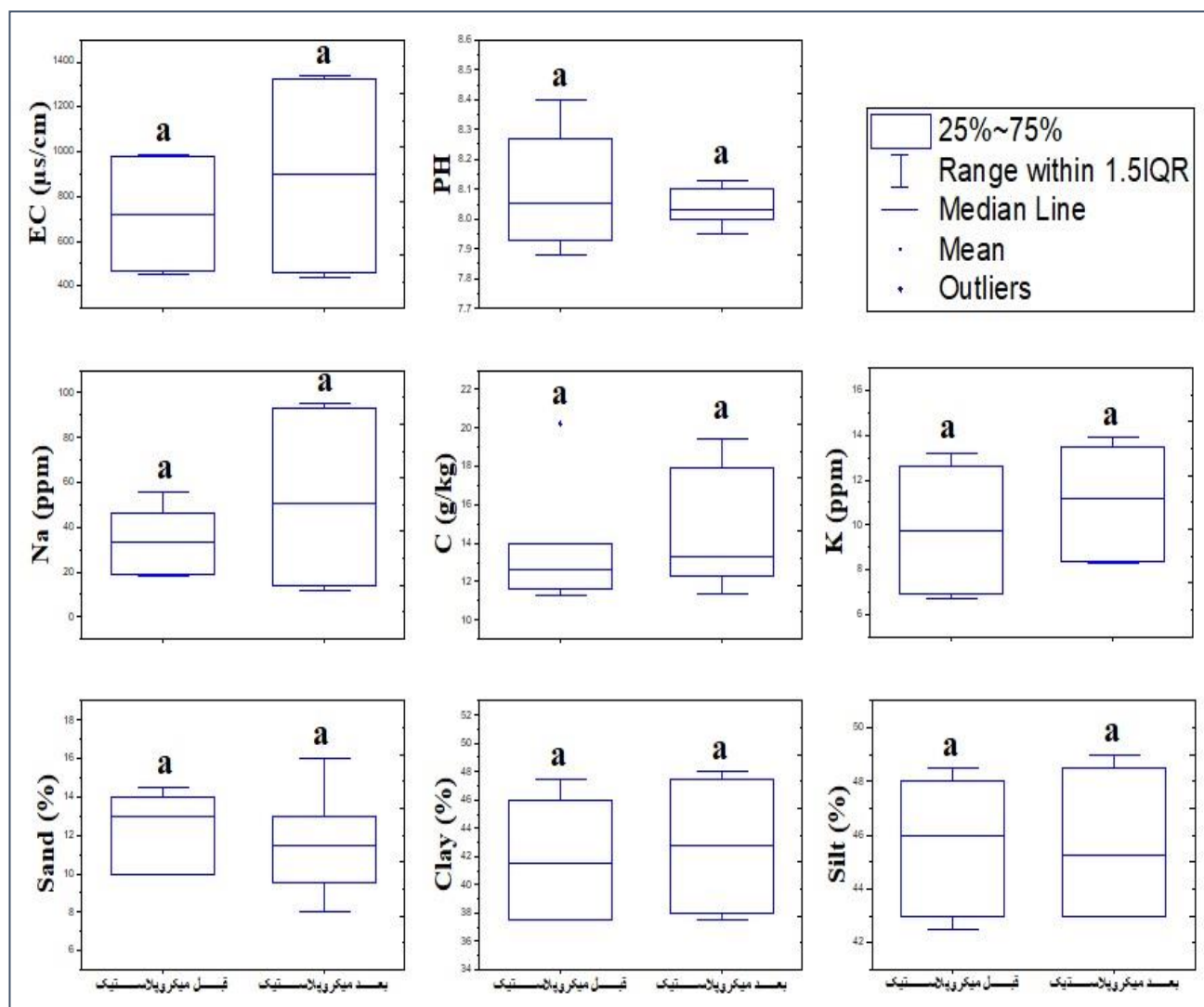
Wang et al., (2022) در تحقیقی نشان دادند که غلظت بالای میکروپلاستیک (۴٪ وزنی خاک و بیشتر) PE در خاک ۲٪ بافت خاک را تخریب می‌کند. همچنین نشان داده شده است که وجود میکروپلاستیک PS در خاک آنتی‌سول و آلیک‌لوی‌سول باعث کاهش

۱ میکروزیمنس بر سانتی‌متر

۲ واحد در میلیون

۳ گرم در کیلوگرم

تشکیل خاک‌دانه می‌شود (Inggraffia et al., 2021), (Lozano et al., 2021) با اضافه کردن مقدار ۴ درصد میکروپلاستیک PET به خاک ماسه‌ای دریافتند که خاک‌دانه‌های خاک کاهش می‌یابند. به طور کلی، پلاستیک‌ها دارای بار مثبت هستند (Larue et al., 2021). تحت هوازگی محیطی، ظهور گروه‌های عامل کربونیل^۱ منجر به بار منفی کلی ذرات میکروپلاستیک می‌شود (Fotopoulou & Karapanagioti., 2012). به دلیل هوازگی محیطی، سطوح ذرات میکروپلاستیک اغلب باردار می‌شوند، و ممکن است بار مثبت یا منفی به خود بگیرند. اما مطالعات محدودی در مورد تعامل میکروپلاستیک‌ها با بار متفاوت با خاک وجود دارد (Wang et al., 2022). ویژگی‌های سطحی میکروپلاستیک‌ها مانند نقطه بار صفر، مساحت سطح و حجم منافذ، توپوگرافی سطح، گروه‌های عاملی و رفتار اسید-باز عوامل مهمی هستند که بر جذب تأثیر می‌گذارند. رس‌ها دارای بار منفی هستند و به احتمال زیاد موقع ورود میکروپلاستیک‌ها به خاک به سطح میکروپلاستیک با بار مثبت می‌چسبند. این فرایند می‌تواند مانع فرسایش رس‌ها در اثر فرسایش ناشی از بارش باران یا آبیاری شود. Inggraffia et al., (2022) نشان دادند که اثرات الیاف میکروپلاستیک پلی‌استر بر پارامترهای فیزیکی خاک و فرسایش به‌طور قابل توجهی به نوع خاک بستگی دارد. آن‌ها نشان دادند که آلودگی به الیاف میکروپلاستیک می‌تواند بر چگالی ظاهری خاک و کیفیت فیزیکی خاک تأثیر بگذارد و تشکیل کلوخه‌های جدید را کاهش دهد، اما بر پایداری آن‌ها در آب تأثیر نداشت.



شکل ۲. انجام آزمون T-test روی پارامترهای (EC, pH, Na, K, OC) خاک و پارامترهای بافت خاک (Clay, Silt, Sand)، قبل از ورود میکروپلاستیک PET و بعد از آن در سطح کرت‌های مرتع

جدول ۱. تغییرات ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی خاک در کرت‌های مرتع قبل و بعد از اضافه کردن میکرو پلاستیک PET در سطح خاک

کرت مرتع	قبل از اضافه کردن میکروپلاستیک		بعد از اضافه کردن میکروپلاستیک		درصد تغییرات عناصر		تفاوت تغییرات کرت استاندارد و آزمایش
	کرت استاندارد	کرت آزمایش	کرت استاندارد	کرت آزمایش	کرت استاندارد	کرت آزمایش	
هدایت الکتریکی ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	۱۱۱۲	۷۲۰/۸	۱۱۰۰	۸۹۴/۱	-۱/۰۸	۲۴/۰۴	۲۵/۵
pH	۸/۰۷	۸/۰۹	۸/۰۷	۸/۰۴	۰	-۰/۶۱	-۰/۶۱
پتاسیم (ppm)	۹/۱	۹/۸۲	۸/۹۱	۱۱/۰۶	-۲/۰۸	۱۲/۷	۱۴/۷۸
سدیم (ppm)	۶۳	۳۴/۳۵	۶۲	۵۲/۴	-۱/۶	۵۲/۶	۵۴/۲
کربن آلی (g kg^{-1})	۱۳/۵	۱۳/۷۲	۱۳/۱۳	۱۴/۶	-۲/۷	۶/۴	۹/۱
رس (%)	۴۱/۳۳	۴۱/۹۱	۴۰	۴۲/۷۵	-۳/۲۱	+۲	-۵/۲۲
سیلت (%)	۴۷/۴۱	۴۵/۶۶	۴۷/۲۵	۴۵/۷۵	-۰/۳۳	+۰/۱۹	-۰/۵۳
ماسه (%)	۱۱/۲۵	۱۲/۴۱	۱۲/۷۵	۱۱/۶۶	+۱۳/۳۳	-۶/۰۴	+۱۹/۳۷

تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تحت تاثیر میکروپلاستیک‌ها در کرت‌های کشاورزی

قبل از ورود میکروپلاستیک PET و شروع آبیاری‌ها میانگین مقدار pH از ۷/۹ به ۸/۰۸، Na از ۵۴/۰۱ به ۶۳/۹۱ ppm، K از ۱۳/۶۳ به ۱۵/۱۴ ppm و OC از ۱۱/۵ به ۱۳/۳ g/kg بعد از ورود میکروپلاستیک و اتمام آبیاری‌ها افزایش یافتند. اما مقدار EC از ۱۱۱۹ به ۱۱۰۹ $\mu\text{S}/\text{cm}$ کاهش یافت. بر اساس نتایج حاصل از آزمون T-test در مقایسه عناصر خاک قبل و بعد از ورود میکروپلاستیک در کرت آزمایش به صورت غیر معنی دار EC کاهش، Na افزایش و OC افزایش داشته‌اند و مقدار pH از 7.91 ± 0.075 به 8.08 ± 0.075 (t-value = - 4.28, p= 0.002) و پتاسیم از 13.65 ± 0.26 به 15.14 ± 0.56 (t-value = - 5.87, p= 0.001) به صورت معنی‌دار افزایش داشتند (جدول ۲ و شکل ۲). در تحقیقاتی که تاکنون در این مورد انجام شده نتایج زیر به دست آمده‌اند.

اضافه کردن میکروپلاستیک HDPE^۱ با اندازه‌های ۱۰ تا ۱۵۴ میکرومتر به خاک لومی - شنی، باعث افزایش pH خاک می‌شود (Hanif et al, 2024; Yang et al. 2021). همچنین وجود فیلم‌های با جنس LDPE^۲ به قطرهای ۴ و ۱۰ میلی‌متر و اضافه شدن میکروپلاستیک‌های LDPE با اندازه‌های ۵۰ میکرومتر تا ۱ میلی‌متر در خاک ماسه‌ای باعث افزایش pH خاک می‌شود (Qi et al, 2020). اضافه شدن میکروپلاستیک PE با اندازه‌های ۱۰ تا ۱۵۴ میکرومتر به خاک لومی - شنی باعث کاهش pH خاک شد (Wang et al, 2020). Zhao et al., (2021) در آزمایشی ۸ نوع میکروپلاستیک (از جمله میکروپلاستیک PET) را به اندازه ۴ درصد وزنی به خاک ماسه‌ای اضافه کردند و دریافتند که pH خاک بعد از اضافه شدن میکروپلاستیک‌های با شکل قطعه‌ای و فوم، افزایش یافت. با اضافه کردن میکروپلاستیک‌های قطعه‌ای و فیبرهای پلی‌اتیلن به خاک (۱٪ وزن خاک) میزان شستشوی پتاسیم تحت تاثیر فرسایش کاهش می‌یابد. همچنین هرچه اندازه ذرات میکروپلاستیک بزرگ‌تر باشند میزان شستشوی پتاسیم بیشتر کاهش می‌یابد (Yan et al, 2023).

تحقیقات بالا بر افزایش PH و کاهش شستشوی پتاسیم در خاک به علت وجود میکروپلاستیک اشاره دارند. این در حالی است که در کرت استاندارد (در شرایط عدم وجود میکروپلاستیک PET و به علت وجود فرسایش آبی) تمام پارامترهای مورد بررسی به صورت غیر معنی‌دار و pH (t-value = - 4.28, p= 0.002) و پتاسیم (t-value = - 5.87, p= 0.001) به صورت معنی‌دار کاهش داشتند (جدول ۲). بنابراین می‌توان یکی از عوامل افزایش pH خاک و پتاسیم خاک را در کرت آزمایش به وجود میکروپلاستیک PET نسبت داد.

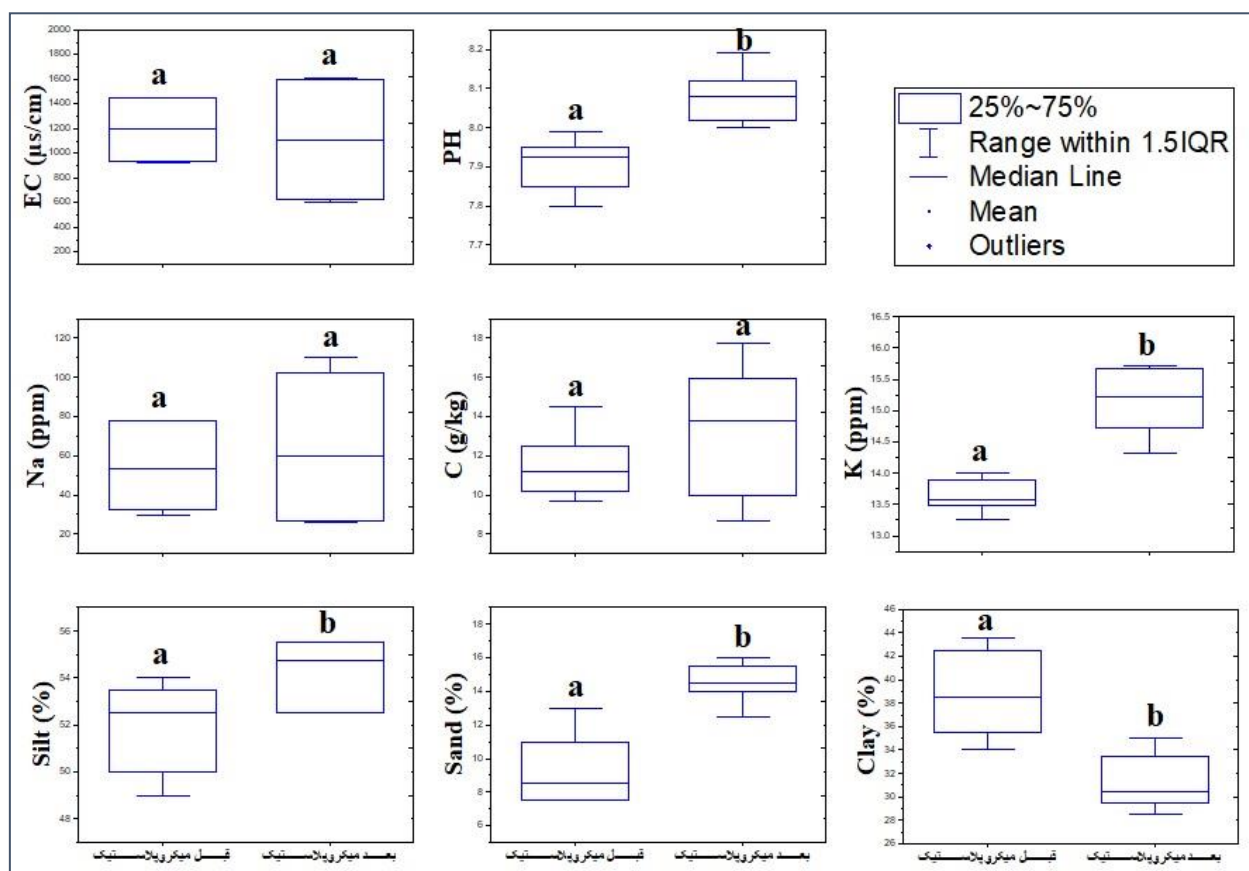
خاک کرت‌های کشاورزی از نوع سیلتی - رسی بود. بعد از ورود میکروپلاستیک PET و پایان آبیاری‌ها رس به طور میانگین ۱۹/۳۵ درصد کاهش یافت. اما میانگین سیلت ۴/۴۹ درصد و میانگین ماسه ۵۵/۳۵ درصد افزایش یافت. در کرت آزمایش مقدار رس از 38.75 ± 3.85 به 31.25 ± 2.5 (t-value = - 3.99, p= 0.003) صورت معنی‌دار کاهش داشت و مقدار سیلت از 51.91 ± 2.01 به 54.25 ± 1.4 (t-value = 4.93, p= 0.001) ۹.۳۳±۲.۲۲ به ۱۴.۵±۱.۲۶ (t-value = 2.33, p= 0.045) کاهش و ماسه از ۱۱/۲۵ به ۱۲/۴۱ (t-value = 2.33, p= 0.045) داشتند (جدول ۲).

در کرت استاندارد بعد از سه مرحله آبیاری مقدار رس ۲۲/۴۲ درصد کاهش، مقدار سیلت ۴/۴۵ درصد افزایش و مقدار ماسه ۵۳/۹۷

درصد افزایش داشته اند. با توجه به داده‌های جدول شماره ۲ مشاهده می‌کنیم که در کرت آزمایش مقدار رس ۳/۰۷ درصد کمتر از کرت استاندارد کاهش و مقدار ماسه ۱/۳۸ درصد بیشتر از کرت استاندارد افزایش یافت اما تغییرات سیلت با ۰/۰۴ اختلاف تفاوتی نداشت. در کرت آزمایش در کاربری مرتع هم مقدار رس ۵/۲۲ درصد کمتر از کرت استاندارد کاهش پیدا کرد و مقدار ماسه ۱۹/۳۷ درصد بیشتر کاهش یافت اما تغییرات سیلت با ۰/۵۳ اختلاف، تقریباً در هر دو کرت آزمایش و استاندارد تفاوتی نداشت.

جدول ۲. تغییرات ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی خاک در کرت‌های کشاورزی قبل و بعد از اضافه کردن میکرو پلاستیک PET در سطح خاک

کرت کشاورزی	قبل از اضافه کردن میکروپلاستیک		بعد از اضافه کردن میکروپلاستیک		درصد تغییرات		تفاوت تغییرات کرت استاندارد و آزمایش
	کرت استاندارد	کرت آزمایش	کرت استاندارد	کرت آزمایش	کرت استاندارد	کرت آزمایش	
هدایت الکتریکی ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	۱۱۸۴	۱۱۱۹	۱۱۷۰	۱۱۰۹	-۰/۰۱	-۰/۸۹	-۰/۸۸
pH	۷/۹۵	۷/۹	۷/۶۳	۸/۰۸	-۴/۰۲	-۲/۲۷	-۱/۷۵
پتاسیم (ppm)	۱۳/۹	۱۳/۶۳	۱۳	۱۵/۱۴	-۶/۵	۱۱/۱	۴/۵
سدیم (ppm)	۷۳/۵	۵۴/۰۱	۶۸/۲	۶۳/۹۱	-۷/۲	۱۸/۳	۱۱/۱
کربن آلی (g kg^{-1})	۱۰/۲	۱۱/۵	۹	۱۳/۳	-۱۱/۸	۱۵/۶	۳/۸
رس (%)	۳۷/۹۱	۳۸/۷۵	۲۹/۴۱	۳۱/۲۵	-۲۲/۴۲	-۱۹/۳۵	-۳/۰۷
سیلت (%)	۵۰/۵	۵۱/۹۲	۵۲/۷۵	۵۴/۲۵	+۴/۴۵	+۴/۴۹	+۰/۰۴
ماسه (%)	۱۱/۵۸	۹/۳۳	۱۷/۸۳	۱۴/۵	+۵۳/۹۷	+۵۵/۳۵	+۱/۳۸



شکل ۲. آزمون T- روی پارامترهای (EC, pH, Na, OC) خاک و پارامترهای بافت خاک (Clay, Silt, Sand)، قبل از ورود میکروپلاستیک PET و بعد از آن در سطح کرت‌های کشاورزی

مهم‌ترین محدودیت این تحقیق فراهم نبودن بازه زمانی یکسان برای آزمایش، در کرت‌های احداث شده در مرتع و کشاورزی بود. زیرا فاصله بین آبیاری‌ها قابل کنترل و تعریف شده بود (۸ هفته)، اما فاصله بین بارش‌ها در سطح کرت‌های مرتع از پیش تعیین شده نبود (۷

ماه به طول انجامید). بنابراین عامل زمان هم در کنار نوع کاربری و نوع خاک، به عنوان یک عامل موثر بر میزان تاثیر میکروپلاستیک PET بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک در این تحقیق در نظر گرفته شد. اضافه کردن میکروپلاستیک در محیط طبیعی و کشاورزی باعث آلودگی محیط می شود. برای اجرای آزمایش چاره‌ای جز اضافه کردن میکروپلاستیک در محیط نبود. اما راه کار ما برای مقابله با آلودگی بیشتر، جمع آوری خاک سطح کرت‌ها بعد از اتمام آزمایش و انتقال آن به کوره آجر پزی بود.

نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده در کرت‌های کشاورزی و کرت‌های مرتع می توان تاثیر میکروپلاستیک‌ها بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک را مشاهده کرد. در مقایسه کرت‌های آزمایش با کرت‌های استاندارد در هر دو کاربری، OC، K و Na در کرت آزمایش افزایش داشتند. اما هدایت الکتریکی در کاربری کشاورزی کاهش و در کاربری مرتع افزایش بود. pH در کاربری مرتع در کرت آزمایش کاهش یافت اما در کاربری کشاورزی در کرت آزمایش به صورت معنی دار افزایش یافت. مشاهده می کنیم که تغییرات ویژگی‌های شیمیایی مورد بررسی خاک در کاربری مرتع با کاربری کشاورزی تفاوت داشت. بنابراین می توان نتیجه گرفت که اثرات میکروپلاستیک بر ویژگی‌های شیمیایی خاک به نوع خاک، نوع کاربری و مدت زمان حضور میکروپلاستیک‌ها در خاک وابسته است. اما تغییرات بافت خاک در هر دو کاربری مرتع (خاک سیلتی - رسی) و کشاورزی (خاک سیلتی - رسی) تفاوتی نداشت. و در هر دو کاربری ورود میکروپلاستیک PET کمی باعث افزایش درصد رس و کاهش درصد ماسه شد. با توجه به نتایج تحقیقات قبل و تحقیق حاضر، پیشنهاد می شود که تاثیر میکروپلاستیک‌های پرکاربرد مثل پلی اتیلن سبک (HDPE) و سنگین (LDPE) بر ویژگی‌های مهم دیگر خاک مثل میزان فسفر (P) و نیتروژن (N) نیز آزمایش شود. همچنین پیشنهاد می شود که تاثیر میکروپلاستیک‌های زیست تخریب پذیر مثل پلی لاکتیک اسید (PLA) در شرایط آبیاری و بارش متفاوت و شرایط کشت متفاوت در خاک، آزمایش شوند. نتایج این تحقیقات در انتخاب الگوی کشت پایدار در راستای حذف میکروپلاستیک‌ها از خاک به روش گیاه پالایی، یا کاهش اثرات مخرب آن‌ها بر خاک بسیار موثر خواهد بود.

"هیچ گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

تفویضی، مهدی؛ بابا اکبری، ساری و دلاور، محمد امیر. (۲۰۲۱). تاثیر ذرات میکروپلاستیک از جنس پلی اتیلن سبک بر برخی ویژگی‌های بیولوژیکی و فعالیت آنزیمی در یک خاک آهکی. *تحقیقات آب و خاک ایران*, ۵۲(۵), ۱۲۸۷-۱۲۹۷.

تفویضی، مهدی؛ بابا اکبری، ساری و دلاور، محمد امیر. (۲۰۲۳). تاثیر ذرات میکروپلاستیک پلی اتیلنی بر غلظت برخی عناصر غذایی در یک خاک آهکی. *تحقیقات کاربردی خاک*, ۱۱(۱), ۳۰-۴۲.

REFERENCES

- Ascott, M. J., Goody, D. C., Wang, L., Stuart, M. E., Lewis, M. A., Ward, R. S., & Binley, A. M. (2017). Global patterns of nitrate storage in the vadose zone. *Nature Communications*, 8(1), 1416.
- Bagrifam, Saba, Delavar, Mohammad Amir, Keshavarz, Peyman, & Karimi. (2021). A review of soil carbon measurement methods: experimental considerations, advantages and disadvantages. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 10(4), 1-30.
- Boots, B., Russell, C. W., & Green, D. S. (2019). Effects of microplastics in soil ecosystems: above and below ground. *Environmental science & technology*, 53(19), 11496-11506.
- Bouma, J. (1991). Influence of soil macroporosity on environmental quality. *Advances in agronomy*, 46, 1-37.
- Carter, M. R., & Gregorich, E. G. (2007). *Soil sampling and methods of analysis*. CRC press.
- Carter, M. R., & Gregorich, E. G. (2007). *Soil sampling and methods of analysis*. CRC press.
- Chen, W. F., Zhang, W. M., & Meng, J. (2014). Biochar and agro-ecological environment: review and prospect. *Journal of Agro-Environment Science*, 33(5), 821-828.
- Cheng Y, Guo Y, Wang F, Zhang L. Effects of polyethylene microplastics stress on soil physicochemical properties mediated by earthworm *Eisenia fetida*. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2024 Feb;31(8):12071-12082. doi: 10.1007/s11356-024-32007-8. Epub 2024 Jan 16. PMID: 38227261.
- Chia, R. W., Lee, J. Y., Jang, J., Kim, H., & Kwon, K. D. (2022). Soil health and microplastics: a review of

- the impacts of microplastic contamination on soil properties. *Journal of Soils and Sediments*, 22(10), 2690-2705.
- de Souza Machado, A. A., Lau, C. W., Kloas, W., Bergmann, J., Bachelier, J. B., Faltin, E., ... & Rillig, M. C. (2019). Microplastics can change soil properties and affect plant performance. *Environmental science & technology*, 53(10), 6044-6052.
- Feng, X., Wang, Q., Sun, Y., Zhang, S., & Wang, F. (2022). Microplastics change soil properties, heavy metal availability and bacterial community in a Pb-Zn-contaminated soil. *Journal of Hazardous materials*, 424, 127364.
- Fotopoulou, K. N., & Karapanagioti, H. K. (2012). Surface properties of beached plastic pellets. *Marine environmental research*, 81, 70-77.
- Hanif, M. N., Aijaz, N., Azam, K., Akhtar, M., Laftah, W. A., Babur, M., ... & Benitez, I. B. (2024). Impact of microplastics on soil (physical and chemical) properties, soil biological properties/soil biota, and response of plants to it: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-42.
- Higashida, S., & Takao, K. (1986). Relations between soil microbial activity and soil properties in grassland. *Soil Science and Plant Nutrition*, 32(4), 587-597.
- Ingraffia, R., Amato, G., Bagarello, V., Carollo, F. G., Giambalvo, D., Iovino, M., ... & Frenda, A. S. (2021). Polyester microplastic fibers affect soil physical properties and erosion as a function of soil type. *Soil Discussions*, 2021, 1-22.
- Ingraffia, R., Amato, G., Iovino, M., Rillig, M. C., Giambalvo, D., & Frenda, A. S. (2022). Polyester microplastic fibers in soil increase nitrogen loss via leaching and decrease plant biomass production and N uptake. *Environmental Research Letters*, 17(5), 054012.
- Kroetsch, D., & Wang, C. (2008). Particle size distribution. *Soil sampling and methods of analysis*, 2, 713-725.
- Larue, C., Sarret, G., Castillo-Michel, H., & Pradas del Real, A. E. (2021). A critical review on the impacts of nanoplastics and microplastics on aquatic and terrestrial photosynthetic organisms. *Small*, 17(20), 2005834.
- Liang, Y., Lehmann, A., Yang, G., Leifheit, E. F., & Rillig, M. C. (2021). Effects of microplastic fibers on soil aggregation and enzyme activities are organic matter dependent. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 650155.
- Liu, H., Yang, X., Liu, G., Liang, C., Xue, S., Chen, H., ... & Geissen, V. (2017). Response of soil dissolved organic matter to microplastic addition in Chinese loess soil. *Chemosphere*, 185, 907-917.
- Lozano, Y. M., Aguilar-Trigueros, C. A., Onandia, G., Maaß, S., Zhao, T., & Rillig, M. C. (2021). Effects of microplastics and drought on soil ecosystem functions and multifunctionality. *Journal of Applied Ecology*, 58(5), 988-996.
- Lozano, Y. M., Lehnert, T., Linck, L. T., Lehmann, A., & Rillig, M. C. (2021). Microplastic shape, polymer type, and concentration affect soil properties and plant biomass. *Frontiers in plant science*, 12, 616645.
- Machado, A. A. S. W., kloAS, c. zArFl, S. heMPel, & M. c. rillig. 2018. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 24, 1405-1416.
- Mondol, M., Angon, P. B., & Roy, A. (2024). Effects of microplastics on soil physical, chemical and biological properties. *Natural Hazards Research*.
- Nosrati, K. (2013). Assessing soil quality indicator under different land use and soil erosion using multivariate statistical techniques. *Environmental monitoring and assessment*, 185, 2895-2907.
- Qi, Y., Ossowicki, A., Yang, X., Lwanga, E. H., Dini-Andreote, F., Geissen, V., & Garbeva, P. (2020). Effects of plastic mulch film residues on wheat rhizosphere and soil properties. *Journal of Hazardous Materials*, 387, 121711.
- Qian, H., Zhang, M., Liu, G., Lu, T., Qu, Q., Du, B., & Pan, X. (2018). Effects of soil residual plastic film on soil microbial community structure and fertility. *Water, Air, & Soil Pollution*, 229, 1-11.
- Qiu Y, Zhou S, Zhang C, Zhou Y, Qin W. Soil microplastic characteristics and the effects on soil properties and biota: A systematic review and meta-analysis. *Environ Pollut*. 2022 Nov 15; 313:120183. doi: 10.1016/j.envpol.2022.120183. Epub 2022 Sep 17. PMID: 36126769.
- Renard, K. G. (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- Rillig, M. C., & Lehmann, A. (2020). Microplastic in terrestrial ecosystems. *Science*, 368(6498), 1430-1431.
- Rillig, M. C., de Souza Machado, A. A., Lehmann, A., & Klümper, U. (2018). Evolutionary implications of microplastics for soil biota. *Environmental Chemistry*, 16(1), 3-7.
- Rillig, M. C., Lehmann, A., de Souza Machado, A. A., & Yang, G. (2019). Microplastic effects on plants. *New*



- phytologist, 223(3), 1066-1070.
- Shi, J., Wang, Z., Peng, Y., Fan, Z., Zhang, Z., Wang, X., ... & Wang, J. (2023). Effects of microplastics on soil carbon mineralization: the crucial role of oxygen dynamics and electron transfer. *Environmental Science & Technology*, 57(36), 13588-13600.
- Tafvizi, M., Babaakbari, M., & Delavar, M. A. (2021). Effect of Low-Density Polyethylene Microplastic Particles on Some Biological Properties and Enzymatic Activity in a Calcareous Soil. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(5), 1287-1297. (In Persian)
- Tafvizi, M., Babaakbari, M., & Delavar, M. A. (2023). Effect of Polyethylene Microplastic Particles on Some of Nutrients Concentration in a Calcareous Soil. *Applied Soil Research*, 11(1), 30-42. (In Persian)
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38.
- Wang, C., Zhao, J., & Xing, B. (2021). Environmental source, fate, and toxicity of microplastics. *Journal of hazardous materials*, 407, 124357.
- Wang, F., Zhang, X., Zhang, S., Zhang, S., & Sun, Y. (2020). Interactions of microplastics and cadmium on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in an agricultural soil. *Chemosphere*, 254, 126791.
- Wang, X. X., Li, H., Chu, Q., Feng, G., Kuyper, T. W., & Rengel, Z. (2020). Mycorrhizal impacts on root trait plasticity of six maize varieties along a phosphorus supply gradient. *Plant and Soil*, 448, 71-86.
- Wang, Y., Cui, W., Duan, Z., Qin, L., Zhang, H., Cheng, H., & Wang, L. (2022). Investigation of microplastic pollution on paddy fields in Xiangtan City, Southern China. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(54), 81300-81307.
- Wang, Y., Wang, F., Xiang, L., Bian, Y., Wang, Z., Srivastava, P., ... & Xing, B. (2022). Attachment of positively and negatively charged submicron polystyrene plastics on nine typical soils. *Journal of Hazardous Materials*, 431, 128566.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning* (No. 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration.
- Yan, S., Zhang, S., Xu, B., Yan, P., Wang, J., Wang, H., & Aurangzeib, M. (2023). Microplastics change the leaching of nitrogen and potassium in Mollisols. *Science of The Total Environment*, 878, 163121.
- Yan, Z., Xu, L., Zhang, W., Yang, G., Zhao, Z., Wang, Y., & Li, X. (2021). Comparative toxic effects of microplastics and nanoplastics on *Chlamydomonas reinhardtii*: Growth inhibition, oxidative stress, and cell morphology. *Journal of Water Process Engineering*, 43, 102291.
- Yang, W., Cheng, P., Adams, C. A., Zhang, S., Sun, Y., Yu, H., & Wang, F. (2021). Effects of microplastics on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in a soil spiked with ZnO nanoparticles. *Soil Biology and Biochemistry*, 155, 108179.
- Yu, H., Fan, P., Hou, J., Dang, Q., Cui, D., Xi, B., & Tan, W. (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, 115544.
- Zhang, B., Yang, X., Chen, L., Chao, J., Teng, J., & Wang, Q. (2020). Microplastics in soils: a review of possible sources, analytical methods and ecological impacts. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 95(8), 2052-2068.
- Zhang, H., Sun, Q., Liu, Y., Deng, Y., Liu, S., Nan, J., & Lyu, C. (2024). Polyethylene microplastic pollution changes the electrical resistance and thermal conductivity of loess soil. *Journal of Environmental Management*, 371, 123127.
- Zhang, S., Wang, J., Liu, X., Qu, F., Wang, X., Wang, X., ... & Sun, Y. (2019). Microplastics in the environment: A review of analytical methods, distribution, and biological effects. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 111, 62-72.
- Zhao, T., Lozano, Y. M., & Rillig, M. C. (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, 675803.