



Distribution and Morphological Characteristics of Microplastics in Surface Soils of Four Climatic Regions of Fars Province

Shekoufeh Forouzan¹ | Ali Akbar Moosavi^{2✉} | Sajjad Abbasi³ |
Majid Baghernejad⁴

1. Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran E-mail:

forouzan.shekoufeh@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran. E-mail:

aamousavi@gmail.com; aamousavi@shirazu.ac.ir

3. Department of Earth Sciences, School of Science, Shiraz University, Shiraz, Iran. E-mail: sajjad.abbasi.h@gmail.com

4. Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran. E-mail:

majidbaghernejad@yahoo.co.uk

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: March. 30, 2026

Revised: May. 3, 2026

Accepted: May. 19, 2026

Published online: May. 2026

Keywords:

Climate,
Land use,
Microplastic pollution,
Raman spectroscopy

Microplastics (MPs) pose a serious threat to soil ecosystem sustainability and human health. This study investigated the distribution and morphological characteristics (shape, color, size) of MPs in surface soils from four climatic regions of Fars Province, Iran (Darab, Arjan Plain, Sepidan, and Sarvestan). Twenty-seven soil samples were collected, and MPs were extracted using density separation with $ZnCl_2$ solution. Identification was performed via stereomicroscopy, and polymer composition was determined by Raman spectroscopy. Of 128 identified particles, fibers dominated across all regions (91.41%). Sarvestan exhibited 100% fibrous particles, while Darab had the highest proportion of film-like particles. Black particles prevailed in Arjan and Sarvestan, whereas Sepidan showed dominance of blue-dark blue particles and polyamide polymer (66.67%), reflecting its rangeland-tourism land use and high-rainfall climate. The 250–500 μm size class was most abundant in Sepidan (46.30%), while larger particles ($\geq 1000 \mu m$) were mainly observed in the barren lands of Sarvestan. Raman spectroscopy confirmed polyamide and nylon as prevalent polymers. Although no direct significant correlation was found between MP abundance and climatic factors (temperature, precipitation), climate indirectly influences MP size and morphology through processes such as runoff, surface erosion, and sediment dynamics, interacting with local land use. Therefore, tailored management strategies aligned with specific climatic and land-use conditions are essential, particularly in high-rainfall areas like Sepidan and arid regions like Sarvestan.

Cite this article: Forouzan Sh., Moosavi, A. A., Abbasi, S., & Baghernejad, M. (2026). Distribution and Morphological Characteristics of Microplastics in Surface Soils of Four Climatic Regions of Fars Province, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (3), 725-749. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.412332.670114>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.412332.670114>





EXTENDED ABSTRACT

Introduction and Goal

Soil is a complex and dynamic system composed of air, water, decomposing organic matter, plants, living organisms, and minerals derived from rock weathering, and is shaped by a wide range of environmental factors. This natural medium plays a fundamental role in the biogeochemical cycling of key elements such as carbon dioxide, oxygen, nitrogen, and other nutrients, and is therefore essential for the sustainability of life on Earth. Despite its critical ecological functions, soil is increasingly affected by various contaminants, among which plastics represent one of the most prominent and emerging concerns. The degradation of plastic materials leads to the formation of microplastics, which are now recognized as a growing environmental issue in both aquatic and terrestrial ecosystems. Due to their small size and resistance to degradation, microplastics can persist in the environment for hundreds to thousands of years and are therefore considered persistent pollutants. Recent evidence indicates that terrestrial soils constitute one of the main reservoirs for microplastic accumulation. Compared with aquatic systems, soils often contain higher microplastic loads, as they act both as major sinks and as sources transferring microplastics to aquatic environments. Microplastics enter soils through multiple pathways, including the application of soil amendments, landfilling, sewage sludge use, compost and organic fertilizers, wastewater irrigation, plastic mulching residues, tire wear particles, and atmospheric deposition. Characterizing microplastics in terms of size, shape, and color is essential for understanding their behavior, transport pathways, and environmental implications. However, most previous studies have focused on general identification, with limited attention given to the role of climatic conditions and land-use types in shaping morphological patterns. The pronounced climatic diversity of Fars Province, ranging from humid mountainous regions to arid barren plains, provides a unique opportunity to investigate these effects. Accordingly, the main objective of this study was to assess and compare the morphological characteristics (size, shape, color, and polymer type) of microplastics in surface soils from four climatically distinct regions (Arjan and Sepidan versus Sarvestan and Darab) and contrasting land uses (rangeland versus barren land) in Fars Province, Iran.

Materials and Methods

This study investigated the abundance and morphological characteristics of microplastics in calcareous soils of Fars Province, which covers approximately 122,000 km² and exhibits predominantly arid to semi-arid climatic conditions, with mean annual precipitation ranging from 100 to 400 mm and diverse moisture and thermal soil regimes. Four regions—Darab, Sarvestan, Sepidan, and Dasht-e Arjan—were selected to represent this climatic variability. Surface soil samples (0–30 cm) were collected along predefined transects, yielding a total of 27 samples from 6 to 8 sampling stations per region. Samples were air-dried, sieved through a 2 mm stainless steel sieve, and analyzed for physical and chemical properties using standard methods. Microplastics were extracted from 50 g of 1 mm-sieved soil using density separation with a saturated zinc chloride solution (density $\approx 1.7 \text{ g cm}^{-3}$), followed by three repeated vacuum filtration steps. Particles were counted and classified by size, shape, and color using a stereomicroscope and ImageJ software. Polymer composition was identified by micro-Raman spectroscopy. Statistical analyses included descriptive statistics, Kruskal–Wallis and Dunn tests, and Spearman correlation analysis at a 5% significance level.

Results and Discussion

A total of 128 microplastic particles were identified across all samples. Fibrous particles dominated the assemblage, accounting for 91.41% of all microplastics, with the highest dominance observed in Sarvestan, where all detected particles were fibrous. This pattern was attributed to arid climatic conditions, sparse vegetation cover, and the predominance of aeolian transport processes. Film-shaped particles occurred at much lower frequencies and were mainly observed in Darab and Sepidan, reflecting agricultural and recreational activities. Black was the most frequent color in most regions, while blue–navy particles were more abundant in Sepidan, indicating differences in source inputs and polymer weathering under varying climatic conditions. Size distributions also varied regionally: particles in the 250–500 μm range were most common in Sepidan, likely influenced by higher precipitation, surface runoff, and leaching of finer particles, whereas Sarvestan showed a notable presence of larger particles ($>1000 \mu\text{m}$), suggesting greater persistence of polymer fragments in dry, calcareous soils with low organic carbon content. Raman spectroscopy identified nylon and polyamide as the most prevalent polymers, particularly in Sarvestan and Sepidan. Correlation analysis revealed significant relationships between microplastic abundance and certain soil properties (e.g., sodium, magnesium, and bicarbonate), but no direct correlations with temperature or precipitation. These findings indicate that climate exerts an indirect influence on microplastic morphology through processes such as erosion, runoff, and sediment dynamics.

Conclusion and Suggestions

The results demonstrate that surface soils in Fars Province act as effective sinks for microplastics and that climatic conditions, land use, and soil properties jointly control their distribution and morphological characteristics. Future studies should adopt uniform sampling strategies and further investigate microplastic sources and their interactions with soil ecosystems.

Funding

The study was funded by the University of Shiraz, Country Iran.

Authorship contribution

For research articles with several authors, a short paragraph specifying their individual contributions must be provided. The following statements should be used “Conceptualization, Ali Akbar Moosavi, Shekoufeh Forouzan, Sajjad Abbasi, and Majid Baghernejad; methodology, Ali Akbar Moosavi, Shekoufeh Forouzan, Sajjad Abbasi, and Majid Baghernejad; software, Ali Akbar Moosavi, Shekoufeh Forouzan, Sajjad Abbasi; validation, Ali Akbar Moosavi, Shekoufeh Forouzan, Sajjad Abbasi; formal analysis, Ali Akbar Moosavi, Shekoufeh Forouzan, Sajjad Abbasi; investigation, Ali Akbar Moosavi, Shekoufeh Forouzan, Sajjad Abbasi; resources, Ali Akbar Moosavi, Sajjad Abbasi; data curation, Shekoufeh Forouzan, Sajjad Abbasi; writing—original draft preparation, Ali Akbar Moosavi, Shekoufeh Forouzan, Sajjad Abbasi; writing—review and editing, Ali Akbar Moosavi, Shekoufeh Forouzan, Sajjad Abbasi, and Majid Baghernejad; visualization, Ali Akbar Moosavi, Shekoufeh Forouzan, Sajjad Abbasi, and Majid Baghernejad; supervision, Ali Akbar Moosavi, Sajjad Abbasi; project administration, Ali Akbar Moosavi, Sajjad Abbasi; funding acquisition, Ali Akbar Moosavi, Sajjad Abbasi.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

No AI-assisted technologies has been used at any stage of preparing this article.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to express their gratitude to the Vice Chancellor for Research of Shiraz University and the Center for Environmental Studies and Emerging Pollutants for their financial support, spiritual support, and cooperation in the implementation of the present research.

The authors would like to thank anonymous reviewers for their valuable suggestions in manuscript revision.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

توزیع و ویژگی‌های مورفولوژیک میکروپلاستیک‌ها در خاک‌های سطحی چهار منطقه اقلیمی استان فارس

شکوفه فروزان^۱، سید علی اکبر موسوی^۲، سجاد عباسی^۳، مجید باقرنژاد^۴۱. بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. رایانامه: forouzan.shekoufeh@gmail.com۲. نویسنده مسئول، بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. رایانامه: aamousavi@gmail.com;aamousavi@shirazu.ac.ir۳. بخش علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. رایانامه: sajjad.abbasi.h@gmail.com۴. بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. رایانامه: majidbaghernejad@yahoo.co.uk

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۱/۱۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۲/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۲۶

تاریخ انتشار: خرداد ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:

اقلیم،

آلودگی میکروپلاستیک،

طیف‌سنجی رامان،

کاربری اراضی

میکروپلاستیک‌ها به عنوان یک معضل نوظهور، پایداری اکوسیستم‌های خاکی و سلامت انسان را با تهدید جدی مواجه کرده‌اند. با توجه به نقش خاک به‌عنوان مخزن اصلی آلاینده‌های پلیمری، درک رفتار این ذرات در اقلیم‌های مختلف برای مدیریت خطرات محیطی ضروری است. هدف این پژوهش بررسی توزیع و ویژگی‌های مورفولوژیک (شکل، رنگ و اندازه) میکروپلاستیک‌ها در خاک‌های سطحی چهار منطقه اقلیمی استان فارس (مناطق داراب، دشت ارژن، سپیدان و سروستان) می‌باشد. ۲۷ نمونه خاک سطحی جمع‌آوری و ذرات پلاستیک با روش جداسازی چگالی بر پایه محلول اشباع کلرید روی استخراج شدند. شناسایی ذرات به وسیله استرئومیکروسکوپ و تعیین ترکیب پلیمری با طیف‌سنجی رامان انجام شد. نتایج نشان داد که از مجموع ۱۲۸ ذره شناسایی شده، شکل رشته‌ای (۹۱/۴۱٪) الگوی غالب در تمامی مناطق است، با این حال منطقه سروستان با ۱۰۰٪ شکل رشته‌ای و داراب با بیشترین سهم ذرات صفحه‌ای، تفاوت‌های معناداری داشتند. رنگ غالب در مناطق ارژن و سروستان سیاه بود، در حالی که در منطقه سپیدان، غلبه رنگ آبی-سورمه‌ای و پلیمر پلی‌آمید (۶۶/۶۷٪) بازتابی از کاربری مرتعی-گردشگری و اقلیم پرباران منطقه است. بیشترین سهم اندازه ذرات میکروپلاستیک مربوط به کلاس ۲۵۰ تا ۵۰۰ میکرومتر (۴۶/۳۰٪) در سپیدان بود، اما ذرات درشت‌تر (بزرگتر از ۱۰۰۰ میکرومتر) عمدتاً در اراضی بایر سروستان مشاهده شدند. یافته‌های طیف‌سنجی رامان نیز غلبه پلی‌آمید و نایلون را تأیید کردند. به طور کلی، نتایج نشان داد اگرچه بین فراوانی میکروپلاستیک‌ها و متغیرهای اقلیمی دما و بارش رابطه مستقیم و معنی‌داری مشاهده نشد، اما اقلیم از طریق تأثیر بر فرآیندهایی مانند رواناب، فرسایش سطحی و پویایی رسوبات، در کنار منابع محلی و نوع کاربری اراضی، نقش غیرمستقیمی در توزیع اندازه و ویژگی‌های مورفولوژیک میکروپلاستیک‌ها ایفا می‌کند. بر این اساس، در مناطق پرباران مانند سپیدان و مناطق خشک مانند سروستان، راهبردهای مدیریتی متناسب با شرایط اقلیمی و کاربری اراضی ضروری است.

استناد: فروزان، شکوفه؛ موسوی، سید علی اکبر؛ عباسی، سجاد؛ و باقرنژاد، مجید (۱۴۰۵). توزیع و ویژگی‌های مورفولوژیک میکروپلاستیک‌ها در خاک‌های سطحی چهار منطقه اقلیمی استان فارس، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۷ (۳)، ۷۴۹-۷۲۵.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.412332.670114>

© نویسنده‌گان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.412332.670114>

مقدمه

خاک سامانه طبیعی، پیچیده، پویا و محیطی شامل مواد معدنی، آلی، موجودات زنده بی‌شمار، مایعات و گازها است که همگی با یکدیگر و از طریق کارکردهای گوناگون، بقای حیات در کره زمین را ممکن می‌سازند (Al-Kaisi et al., 2017). این محیط به‌عنوان یک منبع طبیعی و تا حدود زیادی تجدید ناپذیر در نظر گرفته می‌شود (Banwart, 2019). از سوی دیگر، همین بستر طبیعی نقش اساسی در چرخه عناصر مهمی همچون دی اکسید کربن، اکسیژن، نیتروژن و سایر عناصر دارد و از عوامل کلیدی پایداری حیات در کره زمین به شمار می‌رود (Weil & Brady, 2016).

با وجود نقش حیاتی خاک در اکوسیستم، این محیط طبیعی تحت تأثیر آلاینده‌های مختلف قرار دارد، که پلاستیک‌ها برجسته‌ترین آن‌ها هستند. در طول چند دهه گذشته، پلاستیک‌ها شیوه زندگی انسان را متحول کرده‌اند و اکنون بشر در عصر پلاستیک زندگی می‌کند (Thompson et al., 2009). پلاستیک‌ها در سیستم‌های زمینی، جایی که با موجودات زنده در تعامل مستقیم هستند، تولید، استفاده و یا دفع می‌شوند (Machado et al., 2018). هر ساله حجم بیشتری از پلاستیک‌ها وارد محیط‌زیست می‌شود و این مواد به دلیل دوام و ماندگاری زیاد خود برای مدت طولانی در محیط باقی می‌مانند (Okoffo et al., 2021). آلودگی ناشی از تجزیه پلاستیک‌ها سبب تولید میکروپلاستیک‌ها شده است که به عنوان یکی از نگرانی‌های فزاینده و معضلات نوظهور در اکوسیستم‌های آبی و خاکی مطرح است (Horton et al., 2017). میکروپلاستیک‌ها به عنوان قطعات پلاستیکی با اندازه کمتر از ۵ میلی‌متر تعریف می‌شوند (Thompson et al., 2009). این ذرات پلاستیکی در ابعاد میلی‌متری و کوچکتر، به دلیل ماهیت تجزیه ناپذیر خود و ماندگاری صدها و تا هزاران ساله در محیط، به عنوان آلاینده‌های پایدار شناخته می‌شوند و به سبب حضور گسترده در تمامی محیط‌های طبیعی و تهدید برای اکوسیستم‌ها و سلامت انسان در سال‌های اخیر توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده‌اند (Galloway et al., 2017; Singh et al., Wu et al., 2017; Tang et al., 2024).

ورود ذرات میکروپلاستیک به خاک از طریق نهشت جوی، فعالیت‌های شهری، صنعتی و کشاورزی، محیط خاک را به یکی از منابع بالقوه تجمع و انتقال این آلاینده‌ها تبدیل کرده است. از این‌رو، بررسی حضور و پراکنش میکروپلاستیک‌ها در خاک، به‌منظور ارزیابی مخاطرات زیست‌محیطی و اتخاذ راهکارهای مدیریتی مناسب، ضروری است (Lechner et al., 2014; Jambeck et al., 2015). ویژگی‌های فیزیکی میکروپلاستیک‌ها از جمله اندازه، شکل و چگالی، از عوامل کلیدی در تعیین رفتار انتقال، میزان ماندگاری و پراکنش عمودی آن‌ها در محیط خاک محسوب می‌شوند (Rillig et al., 2017; Machado et al., 2018; Dong et al., 2021). با این حال اکثر پژوهش‌های پیشین بر شناسایی کلی این ذرات تمرکز داشته‌اند و کمتر به نقش عوامل کنترل‌کننده اقلیمی و تفاوت کاربری‌های اراضی در ایجاد الگوهای مورفولوژیک متفاوت پرداخته‌اند. در استان فارس، تنوع چشمگیر اقلیمی از مناطق کوهستانی و پر باران تا دشت‌های بایر و خشک، فرصتی منحصر به فرد برای مطالعه تأثیر اقلیم و کاربری بر ویژگی‌های میکروپلاستیک‌ها فراهم آورده است. اطلاعات موجود درباره پراکنش و ویژگی‌های مورفولوژیک میکروپلاستیک‌ها در خاک‌های مختلف ایران محدود است. این شکاف دانشی، ضرورت انجام پژوهش حاضر را توجیه می‌کند، چرا که شناخت الگوهای توزیع اندازه، شکل، رنگ و نوع پلیمر میکروپلاستیک‌ها در خاک‌های با اقلیم و کاربری متفاوت، نه تنها به درک بهتر رفتار و سرانجام این آلاینده‌ها در محیط کمک می‌کند، بلکه مبنایی برای اولویت‌بندی مناطق آلوده، طراحی راهکارهای مدیریتی متناسب با هر منطقه و ارائه داده‌های پایه به سیاست‌گذاران محیط‌زیستی و کشاورزی را فراهم می‌آورد. از این رو انجام چنین پژوهشی در استانی با تنوع اقلیمی و کاربری اراضی مانند استان فارس، از اهمیت علمی و کاربردی زیادی برخوردار است.

از این رو، هدف اصلی این مطالعه بررسی و مقایسه توزیع ویژگی‌های مورفولوژیک میکروپلاستیک‌ها (اندازه، شکل، رنگ و نوع پلیمر) در خاک‌های سطحی چهار منطقه با ویژگی‌های اقلیمی مختلف (دشت‌ارژن و سپیدان با میزان بارش زیاد و دمای کمتر در مقابل سروستان و داراب با بارش کمتر و دمای بیشتر) و کاربری‌های متفاوت (مرعی در مقابل بایر) در استان فارس می‌باشد. فرضیه پژوهش بر این استوار است که شرایط اقلیمی و نوع کاربری اراضی بر ویژگی‌های مذکور تأثیر معنی‌داری دارند و شکل رشته‌ای و رنگ سیاه، الگوهای غالب در تمامی مناطق مورد مطالعه هستند، تا بتوان از این دیدگاه، تصویر روشنی از وضعیت پراکنش و پویایی این آلاینده‌ها در اکوسیستم‌های نیمه‌خشک ارائه نمود.



پیشینه پژوهش

میکروپلاستیک‌ها بر اساس منبع به دو گروه میکروپلاستیک‌های اولیه و ثانویه تقسیم می‌شوند (Thomas et al., 2020) و عمدتاً از ذراتی با ترکیب پلی‌اتیلن^۱ (PE)، پلی‌پروپیلن^۲ (PP)، پلی‌استایرن^۳ (PS)، پلی‌وینیل کلراید^۴ (PVC) و پلی‌اتیلن ترفتالات^۵ (PET) تشکیل شده‌اند (Geyer et al., 2017). همچنین اشکال مشاهده شده میکروپلاستیک‌ها به طور کلی در گروه‌های گلوله‌ای یا کروی، قطعه‌ای یا صفحه‌ای، فوم، فیبری یا خطی و فیلم طبقه‌بندی می‌شوند (Xu et al., 2020; Yang et al., 2021). اگرچه پژوهش‌های اولیه در مورد میکروپلاستیک بر روی آب‌های شیرین و محیط‌های دریایی متمرکز شده است (Rillig, 2012)، اما امروزه مشخص شده که محیط‌های خاکی یکی از اصلی‌ترین مخازن تجمع میکروپلاستیک‌ها هستند. در مقایسه با اکوسیستم‌های آبی، خاک‌های خشکی به طور کلی حاوی میکروپلاستیک‌های بیشتری هستند، زیرا نه تنها به عنوان منبعی کلیدی برای ورود میکروپلاستیک‌ها به محیط‌های آبی عمل می‌کنند، بلکه خود به عنوان یکی از مهمترین مناطق تجمع این ذرات در محیط به شمار می‌روند (Kim et al., 2021). برآوردها نشان می‌دهد که به دلیل مدیریت نشدن صحیح انواع ضایعات از جمله لجن فاضلاب، میزان میکروپلاستیک‌های انباشته شده در اکوسیستم‌های زمینی به مراتب بیشتر از محیط‌های آبی است، به طوری که مقدار آن‌ها حدوداً ۴ تا ۲۳ برابر بیش از میزان پلاستیکی است که سالانه وارد اقیانوس‌ها می‌شود (Horton et al., 2017).

میکروپلاستیک‌ها از مسیرهای مختلفی از جمله، استفاده از اصلاح‌کننده‌های خاک، دفن زباله، استفاده از لجن فاضلاب در اراضی، کاربرد کمپوست و کودهای آلی، آبیاری با فاضلاب، باقیمانده مالچ‌های پلاستیکی، سایش لاستیک اتومبیل‌ها و همچنین از طریق ته‌نشست‌های اتمسفری وارد خاک می‌شوند (Corradini et al., 2019; van den Berg et al., 2020; Guo et al., 2020; Braun et al., 2015; Baensch-Baltruschat et al., 2020; Dris et al., 2015). خاک‌های زراعی می‌توانند از چندین راه مختلف با میکروپلاستیک‌ها آلوده شوند، به عنوان نمونه پلاستیک‌ها به طور گسترده در مناطق کشاورزی (نیمه‌خشک) برای بهبود آب، هوا و فراهم ساختن شرایط مناسب برای رشد گیاهان به صورت خاک‌پوش (مالچ)، پناهگاه یا گلخانه استفاده می‌شوند (Ekebafé et al., 2011). زمین‌های کشاورزی به‌ویژه در مناطقی که از ورقه‌های پلاستیکی برای مالچ‌پاشی استفاده می‌شود، به شدت تحت تأثیر باقیمانده‌های میکروپلاستیک قرار می‌گیرند و این فیلم‌ها به عنوان منبع اصلی میکروپلاستیک‌های خاک شناخته می‌شوند (Zhang et al., 2023). افزون بر این زباله‌های پلاستیکی باقی‌مانده در خاک پس از برداشت، منجر به تخریب خاک و محیط‌زیست شده و پدیده‌ای به نام آلودگی سفید را ایجاد می‌کنند (Liu et al., 2014). مطالعات اخیر نشان می‌دهد که میکروپلاستیک‌ها در همه بخش‌های محیط‌زیست حضور دارند. این آلاینده‌های نوظهور در آب (Eo et al., 2019; Fu & Wang, 2019; Nie et al., 2019)، رسوبات (Prata et al., 2019; Zhang et al., 2020a)، خاک (Li et al., 2020)، گرد و غبار (Abbas et al., 2019; Liu et al., 2019a)، جو (Huang et al., 2020a) و برف (Bergmann et al., 2019) و موجودات زنده (Zhang et al., 2020b) (Feng et al., 2019; Nie et al., 2019; Carlin et al., 2020) و غیره شناسایی شده‌اند. همچنین، میکروپلاستیک‌ها در غذاهای دریایی، نمک، عسل، شکر و آب آشامیدنی یافت شده‌اند (Yang et al., 2015; Horton et al., 2017; Pivokonsky et al., 2018).

حضور میکروپلاستیک‌ها در خاک، کیفیت خاک را به شدت کاهش می‌دهد و این ذرات به دلیل فعالیت‌های زیستی پتانسیل عبور از لایه‌های خاک را دارند و می‌توانند به آب‌های زیرزمینی راه یافته و بر کیفیت آب اثر بگذارند (Rillig et al., 2017; Machado et al., 2018). علاوه بر این، مطالعات آزمایشگاهی نشان داده‌اند که میکروفیبرهای پلی‌استر به طور فیزیکی ساختار خاک را دگرگون می‌کنند. این دگرگونی عمدتاً از طریق اختلال در چیدمان ذرات خاک رخ می‌دهد که منجر به تغییر در تخلخل (افزایش منافذ بزرگ و کاهش منافذ کوچک) می‌شود. این تغییرات، اگرچه در شرایط آزمایشگاهی تأثیر قابل توجهی بر چگالی ظاهری و هدایت هیدرولیکی اشباع ندارند، اما در چرخه‌های تر-خشک مکرر، پایداری خاکدانه‌های بزرگ خاک (بزرگتر از ۲ میلی‌متر) را افزایش داده و در نتیجه بر رفتار هیدرولوژیکی و نگهداری آب و عناصر غذایی تأثیر می‌گذارد (Zhang et al., 2019). مطالعات بسیاری نشان می‌دهد که اضافه شدن میکروپلاستیک‌ها به خاک سبب انتقال آنها توسط باد می‌شود، پلیمرهای متراکم‌تر بیشتر در خاک باقی می‌مانند و در نهایت به لایه‌های عمیق‌تر خاک منتقل

1. Polyethylene (PE)
2. Polypropylene (PP)
3. Polystyrene (PS)
4. Polyvinyl Chloride (PVC)
5. Polyethylene Terephthalat (PET)

می‌شوند، در حالی که پلیمرهای سبک‌تر بیشتر توسط باد و آب منتقل می‌شوند (Horton et al., 2017). این ذرات ساختار خاک، چرخه عناصر غذایی و جامعه میکروبی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند و میزان تأثیر آن‌ها به شکل، نوع پلیمر، اندازه و غلظت وابسته است (Zhao et al., 2022). روابط بین فراوانی میکروپلاستیک و ویژگی‌های خاک، از جمله محتوی شن و رس خاک، پهاش، چگالی ظاهری، مواد آلی و نیتروژن (Álvarez-Lopez et al., 2021; Zhang et al., 2022b; Qiu et al., 2023; He et al., 2023; Zhang et al., 2024)، عوامل اقلیمی مانند بارندگی، دمای سطح، سرعت باد (Zhang et al., 2022a) و تراکم جمعیت گزارش شده است (Bi et al., 2023).

میکروپلاستیک‌ها عمدتاً می‌توانند از طریق بلعیدن و استنشاق به بدن انسان و موجودات زنده وارد شوند و اثرات آنها در بدن به ویژگی‌های آنها شامل اندازه و ترکیب شیمیایی و همچنین ترکیب شیمیایی موادی که بعداً به این ذرات جذب می‌شوند بستگی دارد (دهقانی و یونسین، ۱۴۰۲). مطالعات نشان داده‌اند که میکروپلاستیک‌ها در بافت سبزیجات و میوه‌ها تجمع می‌یابند و بر این اساس، هویج و سیب به ترتیب آلوده‌ترین سبزی و میوه در میان محصولات خوراکی محسوب می‌شوند (Oliver Conti et al., 2020). علاوه بر مسیر خوراکی، انتشار ذرات خاک از سطح زمین به اتمسفر توسط باد نیز یکی از راه‌های مواجهه انسان با این آلاینده‌هاست؛ این پدیده علاوه بر کاهش بهره‌وری خاک، از نظر کیفیت هوا و مسائل بهداشتی نیز اثرات منفی دارد (Pi & Sharratt, 2017; Pi et al., 2017). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که ممکن است انسان در هر سال از ۳۹۰۰۰ تا ۵۲۰۰۰ ذره میکروپلاستیک مصرف کند که با احتساب مقدار ورود از طریق استنشاق می‌تواند به بیش از ۷۴۰۰۰ ذره در سال افزایش یابد (Kannan & Vimalkumar, 2021). بر اساس محاسبات دیگری، میانگین میزان ورود ذرات میکروپلاستیک از طریق گرد و غبار در سال برای بزرگسالان حدود ۱۰۶۳ ذره و برای کودکان ۳۲۲۳ ذره برآورد شده است (Dehghani et al., 2017). در نتیجه ورود میکروپلاستیک‌ها از این دو مسیر (خوراکی و تنفسی) ممکن است با طیفی از پیامدهای زیان‌بار برای سلامت انسان همراه باشند، که از جمله آن‌ها می‌توان به انسداد مجاری گوارشی، اختلال در عملکرد سیستم تولیدمثل، کاهش فعالیت آنزیم‌ها، مهار مسیرهای آنزیمی و کاهش سنتز هورمون‌های استروئیدی اشاره نمود (Wright & Kelly., 2017; Prata et al., 2020; Hou et al., 2021).

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان فارس با مساحتی حدود ۱۲۲ هزار کیلومتر مربع در جنوب غربی ایران واقع شده است. آب و هوای آن خشک تا نیمه خشک با میانگین بارندگی سالانه ۱۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر بوده و دارای رژیم‌های رطوبتی اریدیک، زریک، یوستیک و رژیم‌های حرارتی مزیک، ترمیک و هایپرترمیک می‌باشد (انجوی‌نژاد، ۱۴۰۲؛ Rezaei et al., 2022). این استان نقش راهبردی در تولید، اشتغال و تأمین امنیت غذایی کشور داشته و سهم قابل توجهی در تولید ناخالص ملی ایفا می‌کند. (انجوی‌نژاد، ۱۴۰۲). به منظور بررسی میزان و پراکنش میکروپلاستیک‌ها در خاک‌های آهکی استان فارس، چهار منطقه با شرایط اقلیمی متفاوت شامل شهرستان‌های داراب، سروستان و سپیدان و منطقه دشت ارژن انتخاب شدند. نمونه‌برداری از خاک سطحی در عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر و در امتداد ترانسکت‌های تعریف شده در هر منطقه انجام شد (شکل ۱).

شهرستان داراب: این شهرستان در جنوب شرقی استان فارس با وسعتی حدود ۷۵۰۰ کیلومتر مربع واقع شده است و مرکز آن (شهر داراب) در فاصله حدود ۲۴۲ کیلومتری از شیراز قرار دارد. اقلیم غالب منطقه گرمسیری بوده و میانگین بارش سالانه معمولاً کمتر از ۳۵۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۲۲/۳۳ درجه سلسیوس است. مناطق کوهستانی داراب آب و هوای سردتری داشته و بارش برف در زمستان رایج است. خاک‌های منطقه دارای رژیم رطوبتی اریدیک-یوستیک (با غالبیت اریدیک) و رژیم حرارتی هایپرترمیک هستند (انجوی‌نژاد، ۱۴۰۲). نمونه‌برداری در این شهرستان از شش نقطه در طول یک ترانسکت ۸ کیلومتری انجام شد (شکل ۱).

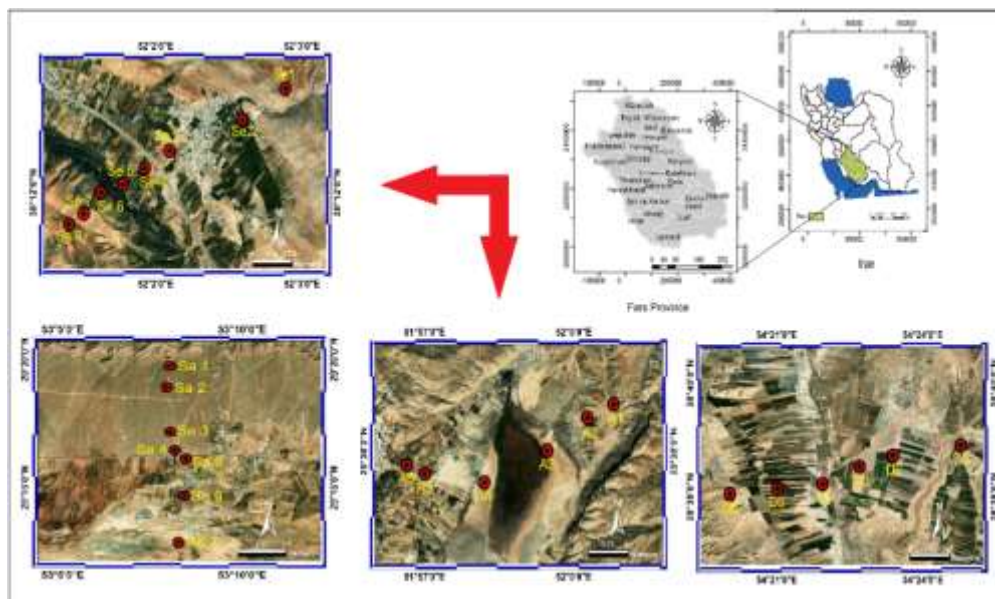
شهرستان سپیدان: این شهرستان در شمال غربی استان فارس واقع شده است و مرکز آن (شهر اردکان) در فاصله ۸۰ کیلومتری شیراز قرار دارد. سپیدان اقلیمی نیمه خشک تا نیمه مرطوب و سرد داشته و میانگین بارش سالانه آن ۶۶۱/۶ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۵/۹ درجه سلسیوس است. عمده بارش‌های زمستانی به صورت برف است و خاک‌های آن دارای رژیم رطوبتی زریک و رژیم حرارتی مزیک می‌باشند (موسوی، ۱۳۸۸). نمونه‌برداری در این شهرستان از هشت نقطه در طول یک ترانسکت ۳ کیلومتری انجام شد (شکل ۱).

دشت ارژن: این منطقه در ۶۰ کیلومتری جنوب غربی شیراز با اقلیم نیمه مرطوب، سرد و کوهستانی قرار دارد. میانگین بارش سالانه آن ۸۰۷/۸ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۳/۸ درجه سلسیوس است. بارش‌های زمستانه به شکل باران و برف است و خاک‌های آن دارای رژیم رطوبتی زیریک و رژیم حرارتی مزیک می‌باشند (انجوی‌نژاد، ۱۴۰۲). نمونه‌برداری در این شهرستان از شش نقطه در طول یک ترانسکت ۷ کیلومتری انجام شد (شکل ۱).

شهرستان سروستان: سروستان دشتی با وسعت حدود ۹۵ هزار هکتار است و مرکز آن (شهر سروستان) در فاصله ۸۰ کیلومتری جنوب شرقی شیراز قرار دارد. اقلیم آن مشابه شیراز و در مرز نواحی سردسیری و گرمسیری استان قرار دارد. میانگین بارش سالانه آن ۲۲۳/۶ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۸ درجه سلسیوس است و عمده بارش‌ها به صورت باران می‌باشد. خاک‌های آن دارای رژیم رطوبتی زیریک و رژیم حرارتی مزیک هستند (سازمان جهاد کشاورزی استان فارس، ۱۳۹۹؛ Abtahi, 1980). نمونه‌برداری در این شهرستان از هفت نقطه در طول یک ترانسکت ۱۰/۲ کیلومتری انجام شد (شکل ۱).

نمونه‌برداری و آزمون‌های خاک

نمونه‌برداری از خاک‌های آهکی واقع در مناطق مورد مطالعه شامل دشت‌های آبرفتی چهار منطقه دشت ارژن، داراب، سروستان و سپیدان انجام شد. ابتدا موقعیت جغرافیایی دقیق ۲۷ ایستگاه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و نرم افزار گوگل ارث تعیین شد. در هر یک از مناطق مورد مطالعه، شش تا هشت نمونه خاک سطحی از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری با بیلچه فولادی ضد زنگ برداشت و به آزمایشگاه منتقل شدند. پس از انتقال به آزمایشگاه، به منظور اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، نمونه‌ها از الک فولادی ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. بافت خاک با روش هیدرومتر (Bouyoucos, 1962) اندازه‌گیری و کلاس بافت با استفاده از مثلث بافت خاک تعیین شد. درصد کربن آلی با روش احتراق مرطوب یا اکسیداسیون تر (Nelson & Sommers, 1996)، پ‌هاش در خمیر اشباع پس از تعادل رطوبتی با پ‌هاش متر دیجیتال کالیبره شده (Thomas, 1996) و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره خمیر اشباع با دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی (Nelson, 1983) اندازه‌گیری شدند. غلظت یون‌های سدیم و پتاسیم محلول در عصاره اشباع با استفاده از دستگاه شعله‌سنج (Page et al., 1982) و غلظت یون‌های کلسیم و منیزیم در عصاره اشباع با روش تیتراسیون با استفاده از محلول استاندارد EDTA (Page et al., 1982) اندازه‌گیری شدند. مقدار کربنات-بی‌کربنات در نمونه‌های خاک نیز با روش تیتراسیون با اسید (Richards, 1954) و کربنات کلسیم معادل (آهک) نیز توسط خنثی‌سازی با اسید کلریدریک (Loeppert & Suarez, 1996) تعیین شدند.



شکل ۱- توزیع محل‌های نمونه‌برداری در استان فارس و نقاط نمونه‌برداری شده در منطقه Sa1 - Sa7: نقاط نمونه‌برداری در سروستان، Sa1-Sa7: نقاط نمونه‌برداری در سپیدان، A1-A6: نقاط نمونه‌برداری در منطقه دشت ارژن و D1-D6: نقاط نمونه‌برداری در داراب

استخراج میکروپلاستیک

برای استخراج ذرات میکروپلاستیک، مقدار ۵۰ گرم از هر نمونه خاک عبور داده شده از الک ۱ میلی‌متری با استفاده از قاشق استیل ضد زنگ به بشرهای شیشه‌ای ۶۰۰ میلی‌لیتری منتقل شد. قبل از استفاده، بشرها با اسید کلریدریک ۵۰٪ شسته و سپس با آب مقطر آبکشی شدند. نمونه‌ها پس از انتقال با ورقه‌های آلومینیومی پوشانده شدند و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در هود لامینار (بدون جریان هوا) خشک شدند. پس از مرحله خشک شدن، به نمونه‌ها ۳۰۰ میلی‌لیتر از محلول اشباع کلرید روی ($ZnCl_2$) با چگالی تقریبی ۱/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب اضافه شد. سپس بعد از یک دوره هم‌زدن اولیه با سرعت ۳۵۰ دور در دقیقه بر روی شیکر با حرکت جانبی، محتویات به مدت ۲۴ ساعت برای ته‌نشینی تحت شرایط کنترل شده قرار گرفتند. پس از این مدت، محلول فوقانی هر بشر با استفاده از پمپ خلأ بر روی کاغذ صافی واتمن گرید ۴۲ (قطر مؤثر منافذ حدود ۲/۵ میکرومتر، قطر ۱۲/۵ سانتی‌متر و Cat. No. 1442-125) منتقل و صاف شد. کل فرایند جداسازی چگالی، شامل افزودن مجدد محلول کلرید روی ته‌نشینی ۲۴ ساعته و فیلتراسیون خلأ، سه مرتبه برای هر نمونه تکرار شد تا بازیابی حداکثری ذرات میکروپلاستیک تضمین شود. فیلترهای نهایی پس از پایان مرحله سوم، به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در هود لامینار خشک و سپس در پتری‌دیش‌های شیشه‌ای در بسته نگهداری شدند. مراحل آماده‌سازی و فیلتراسیون نمونه‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.

شناسایی میکروپلاستیک

فیلترهای به دست آمده از مرحله جداسازی، با استفاده از میکروسکوپ دو چشمی Carl-Zeiss در بزرگنمایی حداکثر ۲۰۰ و با کمک نرم‌افزار ImageJ، به منظور شناسایی، شمارش و تعیین ویژگی‌های مورفولوژیک میکروپلاستیک‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. در فرآیند تشخیص، معیارهایی مانند ضخامت، میزان براقیت، سختی نسبی، ساختار سطح و واکنش ذرات در تماس با سوزن ضدزنگ با قطر ۲۵۰ میکرومتر استفاده شد (Hidalgo-Ruz et al., 2012). اندازه‌گیری ابعاد براساس بیشترین طول ذره انجام شد. ذرات شناسایی شده بر اساس اندازه، شکل و رنگ طبقه‌بندی شدند (جدول ۱).



شکل ۲- مراحل آماده‌سازی و فیلتراسیون نمونه‌ها برای جداسازی میکروپلاستیک‌ها در آزمایشگاه

جدول ۱- طبقه‌بندی میکروپلاستیک‌ها بر اساس اندازه، شکل و رنگ

ویژگی	رده‌بندی
اندازه (میکرومتر)	کمتر از ۱۰۰، ۱۰۰ تا ۲۵۰، ۲۵۰ تا ۵۰۰، ۵۰۰ تا ۱۰۰۰، بزرگتر یا مساوی ۱۰۰۰
شکل	رشته‌ای، صفحه‌ای، چند وجهی، کروی
رنگ	سفید-شفاف، نارنجی-قهوه‌ای، قرمز-صورتی، آبی-سورمه‌ای، زرد-سبز، سیاه

ترکیب شیمیایی و ترکیب پلیمری میکروپلاستیک‌ها نیز با روش طیف‌سنجی رامان با دستگاه طیف‌سنج میکرورامان (μ -Raman) (532-Ci, Avantes, Apeldoorn, Netherland) با لیزر ۷۸۵ نانومتر و شیفت (جهت) (cm^{-1}) ۴۰۰-۱۸۰۰ تعیین و طیف‌های حاصل با کتابخانه‌های طیفی استاندارد پلیمرها برای تعیین انواع میکروپلاستیک مقایسه شدند.

کنترل کیفیت

در مراحل مختلف به منظور حصول اطمینان از کیفیت آزمایش‌ها و دقت نتایج، روش‌ها و تمهیدات لازم به کار گرفته شد. به عنوان نمونه، برای نمونه‌برداری از خاک از یک بیلچه فولادی تمیز و فاقد هرگونه پوشش پلاستیکی استفاده شد (Zhou et al., 2016). برای جلوگیری از آلودگی میکروپلاستیکی، در طول آزمایشگاهی از لباس نخی، ظروف شیشه‌ای شسته‌شده با اتانول و از معرف‌ها و محلول‌های صاف‌شده

با صافی ۲ میکرومتر استفاده و ظروف حاوی محلول‌ها با ورقه آلومینیومی پوشانده شدند (بررسی میکروسکوپی فیلترها وجود هیچ میکروپلاستیکی را نشان نداد). همچنین پیش از باز کردن پتری‌دیش‌ها برای بررسی استریومیکروسکوپی، محیط کار به طور کامل تمیز شد (Nuelle et al., 2014).

تحلیل‌های آماری

برای خلاصه‌سازی داده‌ها از میانگین و انحراف معیار و برای بررسی توزیع داده‌ها از آزمون شپرو-ویلک استفاده شد. با توجه به عدم پیروی داده‌ها از توزیع نرمال، برای مقایسه ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک و فراوانی میکروپلاستیک‌ها بین مناطق مختلف، از آزمون ناپارامتری کروسکال-والیس و آزمون تعقیبی (پس‌آزمون) دان استفاده شد. در شرایطی که اجرای آزمون کروسکال-والیس فراهم نبود (به‌عنوان نمونه، ثابت بودن مقادیر در برخی گروه‌ها یا نبود داده‌های معتبر در یک یا چند گروه)، نتایج به‌صورت توصیفی گزارش شدند. همچنین، از ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن برای بررسی ارتباط بین ویژگی‌های جوی (میانگین بارش و دمای سالانه) با فراوانی میکروپلاستیک‌ها استفاده شد. تمامی مقایسه‌های آماری در سطح احتمال ۵ درصد و با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد.

نتایج

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مناطق مورد مطالعه

خاک‌های مناطق مورد مطالعه دارای پ‌هاش خنثی تا کمی قلیایی (۷/۱۷- ۸/۰۵) و شوری کم تا متوسط بودند (جدول ۲). کربنات کلسیم معادل در بین مناطق تفاوت قابل توجهی داشت و در محدوده ۲۲/۲۵ تا ۸۰/۸۳ درصد متغیر بود، خاک‌های سروستان و برخی خاک‌های سپیدان آهکی‌تر بودند، در حالی که خاک‌های داراب عموماً مقادیر کربنات کلسیم کمتری نسبت به خاک‌های سروستان نشان دادند. در حالی که در مجموع میانگین بیشتر کربنات کلسیم در خاک‌های داراب و سروستان آن‌ها را در مقایسه با خاک‌های سپیدان و دشت ارژن در رده خاک‌های آهکی‌تر قرار می‌دهد، وضعیتی که با ویژگی‌های زمین‌شناسی این مناطق نیز هم‌خوانی دارد. از نظر بافت، خاک‌های داراب و سپیدان عمدتاً ریز بافت‌تر (غنی از سیلت و رس) و خاک‌های سروستان و دشت ارژن درشت بافت‌تر (دارای شن بیشتر) بودند. کربن آلی در محدوده کم تا متوسط (۰/۰۵ تا ۲/۹۲ درصد) قرار داشت و بیشترین مقدار آن در سپیدان مشاهده شد. بررسی کاتیون‌ها نیز حاکی از تفاوت ترکیب یونی در خاک‌های مورد مطالعه بود. در برخی خاک‌های داراب و دشت ارژن مقادیر کلسیم و منیزیم بیشتر بود، در حالی که خاک‌های سروستان غالباً غلظت کمتری از سدیم و پتاسیم داشتند. بی‌کربنات نیز غالباً در محدوده‌های کم تا متوسط قرار داشت و افزایش بی‌کربنات در خاک‌های آهکی‌تر بیانگر شرایط قلیایی و کربناته این مناطق است.

جدول ۲- میانگین برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های سطحی مناطق مورد مطالعه

منطقه	کربن آلی (%)	شن (%)	رس (%)	بی‌کربنات (meq/L)	منیزیم محلول (meq/L)	کلسیم محلول (meq/L)	پتاسیم محلول (meq/L)	سدیم محلول (meq/L)	قابلیت هدایت الکتریکی (dS/m)	کربنات کلسیم معادل (%)	پ‌هاش
سروستان	۰/۸۴c	۴۳/۷۴a	۱۸/۴۵c	۰/۱۷b	۱/۲۲c	۰/۳۷d	۰/۵۰b	۰/۳۷c	۱/۰۳a	۶۱/۱۳a	۷/۴۸c
داراب	۰/۵۵d	۳۷/۱۶b	۱۹/۷۱b	۱/۵۷a	۲/۴۴a	۱/۴۰c	۱/۰۱a	۱/۶۳a	۱/۰۸ab	۳۹/۷۹b	۷/۷۵b
دشت ارژن	۱/۳۵b	۳۲/۵۳c	۱۹/۵۳b	۲/۲۷a	۱/۰۸a	۲/۹۵b	۰/۲۸c	۰/۷۲b	۰/۷۸b	۳۷/۰۰d	۷/۸۳a
سپیدان	۱/۵۸a	۳۵/۲۶c	۲۵/۱۱a	۳/۸۸a	۱/۷۱b	۳/۱۳a	۰/۰۲d	۰/۵۹ab	۰/۵۰ab	۳۹/۰۴c	۷/۳۹a

نتایج آزمون کروسکال-والیس نشان داد که ویژگی‌های خاک در مناطق مورد مطالعه تفاوت معنی‌داری دارند. نتایج آزمون دان نشان داد از نظر پ‌هاش خاک‌های سروستان با هر سه منطقه دیگر تفاوت معنی‌دار ($p < 0.01$) دارد، در حالی که بین پ‌هاش خاک‌های دشت ارژن و سپیدان اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. بر این اساس این دو منطقه در یک گروه آماری مشترک قرار گرفتند و سروستان و داراب در گروه‌های آماری جداگانه طبقه‌بندی شدند. قابلیت هدایت الکتریکی خاک نیز بین خاک‌های مناطق مورد مطالعه، اختلاف معنی‌دار ($p = 0.006$) داشت و بر اساس پس‌آزمون دان تنها بین خاک‌های سروستان و دشت ارژن اختلاف معنی‌داری وجود داشت ($p < 0.05$)، در حالی که سایر مناطق از نظر آماری تفاوتی نداشتند و خاک‌های داراب و سپیدان در یک گروه آماری واسط قرار گرفتند. غلظت سدیم خاک در مناطق مورد مطالعه اختلاف معنی‌دار داشت ($p < 0.001$) به طوری که نتایج آزمون دان نشان داد که بیشترین و کمترین غلظت سدیم

به ترتیب در خاک‌های داراب و سروستان مشاهده شد. غلظت پتاسیم و کلسیم خاک بیشترین تفاوت منطقه‌ای را نشان داد ($p < 0.001$) و نتایج آزمون دان اختلاف معنی‌دار بین غلظت این عناصر در تمامی مناطق مورد مطالعه را تأیید کرد ($p < 0.05$) و بر این اساس هر یک از مناطق در گروه آماری مجزایی قرار گرفتند. نتایج این آزمون همچنین نشان داد غلظت منیزیم در مناطق سروستان و سپیدان به‌طور معنی‌داری با یکدیگر و با سایر مناطق تفاوت دارد ($p < 0.05$). در حالی که تفاوت معنی‌داری بین غلظت منیزیم خاک‌های داراب و دشتارژن مشاهده نشد. نتایج آزمون کروسکال والیس نشان داد که غلظت بی‌کربنات خاک در مناطق مورد مطالعه دارای اختلاف معنی‌داری است ($p = 0.001$). آزمون دان نشان داد غلظت بی‌کربنات در منطقه سروستان به‌طور معنی‌داری با هر سه منطقه داراب، دشتارژن و سپیدان تفاوت دارد ($p < 0.05$). با این حال بین سه منطقه داراب، ارژن و سپیدان اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد ($p > 0.05$). میزان کربن آلی خاک در مناطق چهارگانه دارای اختلاف معنی‌داری بود ($p < 0.001$). بر اساس نتایج آزمون دان، چهار منطقه از نظر ذخیره کربن آلی دارای تفاوت معنی‌داری ($p < 0.05$) بودند و بیشترین میزان کربن آلی در منطقه سپیدان، سپس دشتارژن، سروستان و کمترین مقدار در داراب مشاهده شد. نتایج پس‌آزمون دان نشان داد بیشترین و کمترین درصد رس به ترتیب در خاک‌های مناطق سپیدان و سروستان مشاهده شد که به‌طور معنی‌داری ($p < 0.05$) با سایر مناطق تفاوت داشت. در حالی که بین درصد رس در دو منطقه داراب و دشتارژن اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. نتایج همچنین نشان داد بیشترین و کمترین درصد شن به ترتیب در خاک‌های مناطق سروستان و داراب مشاهده شد که با سایر مناطق تفاوت معنی‌دار داشتند ($p < 0.05$). درصد کربنات کلسیم خاک اختلاف بسیار معنی‌داری بین مناطق نشان داد ($p < 0.001$) و نتایج مقایسه‌های دوتایی بیانگر تفاوت معنی‌دار در بین مناطق مورد مطالعه بود.

نتایج نشان داد ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در مناطق مورد مطالعه دامنه تغییرات نسبتاً زیادی داشتند (جدول ۳). بررسی ضرایب تغییرات نیز نشان داد پتاسیم و بی‌کربنات بیشترین و پ‌ه‌اش کمترین پراکندگی را دارند. بافت اغلب نمونه‌ها لومی بود؛ خاک‌های داراب و دشتارژن عمدتاً ریز بافت (غنی از سیلت) بودند، در حالی که خاک‌های سروستان با درصد شن بیشتر، نسبتاً درشت بافت بودند و خاک‌های سپیدان از نظر بافت، شرایط حدوسط داشتند. کربن آلی ضریب تغییرات نسبتاً زیادی داشت که بیانگر تفاوت مواد آلی در خاک‌های مناطق مورد مطالعه است که می‌تواند ناشی از تفاوت در اقلیم، کاربری، پوشش گیاهی و مدیریت خاک باشد.

جدول ۳- خلاصه آماری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک سطحی کل مناطق مورد مطالعه (۲۷ نمونه)

ویژگی (واحد)	حداقل	حداکثر	میانگین \pm انحراف معیار	میان	ضریب تغییرات	نرمال بودن
پ‌ه‌اش	۷/۱۷	۸/۰۵	۷/۰۵۹/۲۴	۷/۵۸	۳/۲	نرمال
قابلیت هدایت الکتریکی (dS/m)	۰/۳۵	۱/۷۹	۰/۰۸۳/۴۵	۰/۶۹	۵۴/۲	غیر نرمال
سدیم محلول (meq/L)	۰/۳	۳/۲۲	۰/۰۷۹/۶۴	۰/۶	۸۱	غیر نرمال
پتاسیم محلول (meq/L)	۰/۰۲	۲/۱۸	۰/۰۴۲/۴۹	۰/۳۲	۱۱۶/۷	غیر نرمال
کلسیم محلول (meq/L)	۰/۲	۴/۳۲	۱/۱۹۹/۴۳	۲/۰۸	۷۱/۹	غیر نرمال
منیزیم محلول (meq/L)	۰/۲۴	۳/۲۸	۱/۰۶۱/۸۳	۱/۵	۵۱/۵	نرمال
بی‌کربنات (meq/L)	۰/۱۴	۴/۵	۲/۱۱۰۴/۶۶	۲/۲	۸۱/۴	غیر نرمال
کربنات کلسیم (%)	۲۲/۲۵	۸۰/۸۳	۴۴/۱۶۰۴۸/۳۱	۳۹/۵	۳۶/۷	نرمال
رس (%)	۶/۵۱	۲۸/۱	۲۰/۵۰۹۵/۹۹	۲۲/۴	۲۸/۶	غیر نرمال
سیلت (%)	۲۴/۲	۵۶/۳	۴۱/۷۰۷۸/۴۱	۴۲/۱	۱۷/۷	نرمال
شن (%)	۲۲/۷	۶۰/۱	۳۷/۹۰۲۸/۸۸	۳۷/۷۸	۲۶/۵	نرمال
کربن آلی (%)	۰/۰۵	۲/۹۲	۱/۰۱۱/۷۳	۱/۰۱	۶۵/۸	غیر نرمال

توزیع میکروپلاستیک‌ها در خاک‌های مناطق مورد مطالعه

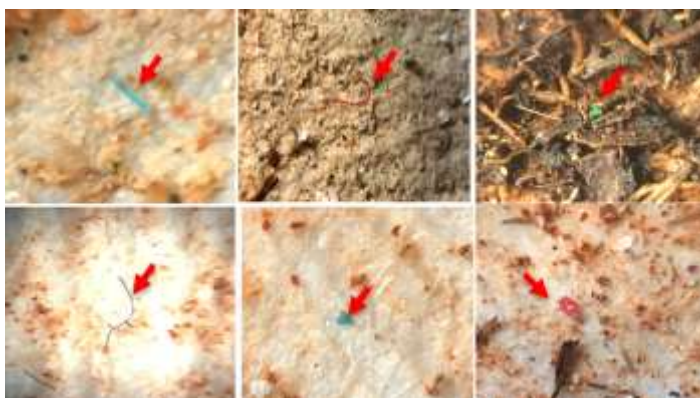
توزیع میکروپلاستیک‌ها از نظر شکل

در مجموع تعداد ۱۲۸ قطعه میکروپلاستیک در تمام نمونه‌های خاک شناسایی شد. به منظور بررسی تفاوت در مورفولوژی میکروپلاستیک‌های موجود در خاک، اشکال مختلف ذرات شناسایی شده شامل رشته‌ای، صفحه‌ای، کروی و سایر در نمونه‌های خاک سطحی مناطق مورد مطالعه به تفکیک و در کل استان فارس مورد مطالعه قرار گرفتند (جدول ۴). در هر چهار منطقه شکل رشته‌ای، شکل غالب میکروپلاستیک‌ها

بود. بیشترین سهم نسبی (۱۰۰٪) میکروپلاستیک‌های رشته‌ای در خاک‌های سروستان مشاهده شد. در مقابل شکل صفحه‌ای تنها به صورت محدود و در مقادیر کمتر ظاهر شد. میکروپلاستیک‌های صفحه‌ای در داراب (۱۲/۵۰٪) و سپیدان (۱۱/۱۱٪) بیشترین مقدار نسبی را به خود اختصاص دادند. در حالی که در سروستان هیچ میکروپلاستیک صفحه‌ای شکلی مشاهده نشد. میکروپلاستیک‌های با شکل‌های کروی و سایر اشکال نیز در خاک‌های هیچ یک از مناطق مورد مطالعه مشاهده نشدند. به طور کلی بر اساس شمارش و طبقه‌بندی انجام شده بر روی مجموع ۱۲۸ ذره میکروپلاستیک شناسایی شده در نمونه‌های خاک، توزیع مورفولوژیکی ذرات نشان داد که شکل رشته‌ای الگوی غالب میکروپلاستیک‌های شناسایی شده در خاک‌های مورد مطالعه می‌باشد. به عبارتی در مجموع ۱۱۷ ذره (۹۱/۴۱٪) از نوع میکروپلاستیک‌های رشته‌ای بودند. در مقابل سهم ذرات صفحه‌ای بسیار محدود بوده و تنها ۱۱ مورد (۸/۵۹٪) از کل ذرات میکروپلاستیک‌ها را تشکیل دادند. در نمونه‌های خاک مورد مطالعه، هیچ ذره میکروپلاستیکی با شکل کروی مشاهده نشد. این الگوی توزیع نشان داد که میکروپلاستیک رشته‌ای غالب‌ترین مورفولوژی میکروپلاستیک‌ها در خاک‌های مورد مطالعه است و سایر اشکال سهم بسیار ناچیزی دارند. شکل ۳ نمونه‌ای از میکروپلاستیک‌های شناسایی شده در زیر میکروسکوپ را نشان می‌دهد.

جدول ۴- تعداد و توزیع نسبی شکل‌های میکروپلاستیک در نمونه‌های خاک سطحی مناطق مورد مطالعه به تفکیک منطقه و در کل استان فارس

شکل	منطقه مورد مطالعه									
	ارژن (تعداد)	ارژن (درصد)	داراب (تعداد)	داراب (درصد)	سروستان (تعداد)	سروستان (درصد)	سپیدان (تعداد)	سپیدان (درصد)	کل استان (تعداد)	کل استان (درصد)
رشته ای	۲۷	۹۶/۴۳	۲۸	۸۷/۵	۱۴	۱۰۰	۴۸	۸۸/۸۹	۱۱۷	۹۱/۴۱
صفحه ای	۱	۳/۵۷	۴	۱۲/۵۰	۰	۰	۶	۱۱/۱۱	۱۱	۸/۵۹
کروی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
سایر	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
مجموع	۲۸	۱۰۰	۳۲	۱۰۰	۱۴	۱۰۰	۵۴	۱۰۰	۱۲۸	۱۰۰



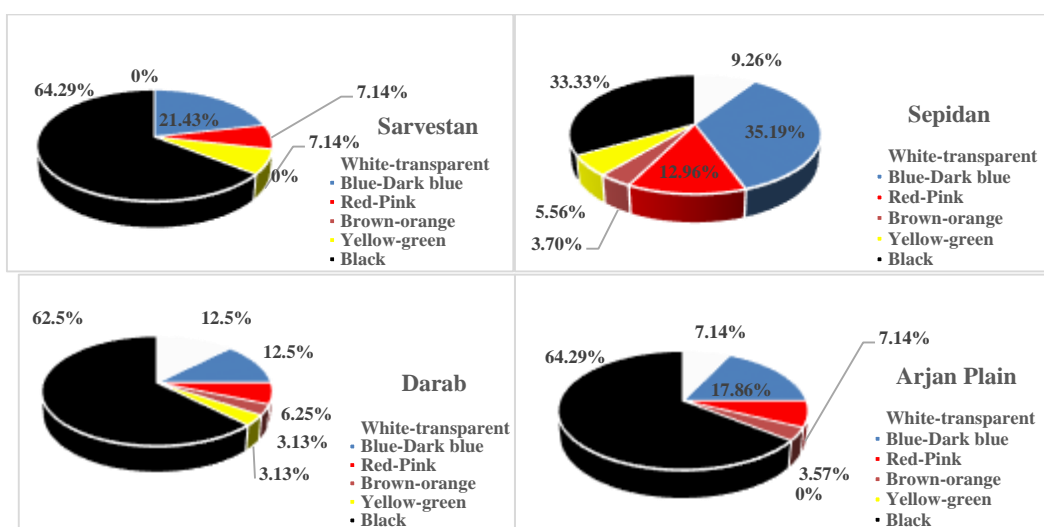
شکل ۳- نمونه‌ای از میکروپلاستیک‌های رشته‌ای و صفحه‌ای جدا شده از خاک‌های مورد مطالعه در زیر میکروسکوپ

توزیع میکروپلاستیک‌ها از نظر رنگ

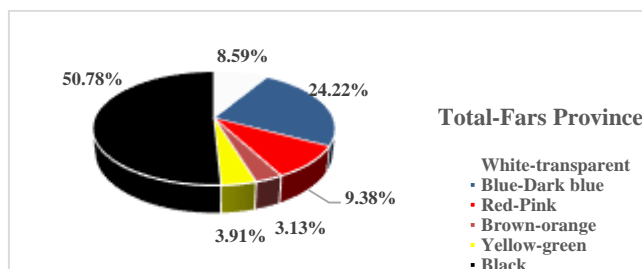
توزیع رنگ‌های مختلف میکروپلاستیک‌ها در خاک‌های چهار منطقه مورد مطالعه در استان فارس در شکل ۴ نشان داده شده است. نمودارهای دایره‌ای سهم نسبی هر رنگ را در هر منطقه به صورت مقایسه‌ای نمایش می‌دهند. بیشترین درصد فراوانی در خاک‌های مناطق مورد مطالعه مربوط به رنگ سیاه بود که در تمامی مناطق مشاهده شد. در حالی که رنگ‌های قهوه‌ای- نارنجی و زرد-سبز سهم کمتری داشتند. رنگ سیاه با سهم ۶۲/۵ تا ۶۴/۲۹ درصد در داراب، ارژن و سروستان رنگ غالب میکروپلاستیک‌های شناسایی شده در خاک‌های

مورد مطالعه می‌باشد. بیشترین سهم میکروپلاستیک‌های آبی-سورمه‌ای (۳۵/۱۹ درصد) در سپیدان مشاهده شد. به دلیل کم بودن تعداد موارد مشاهده شده برای بسیاری از رنگ‌ها و وجود مقادیر صفر در بخش زیادی از گروه‌ها، امکان اجرای آزمون‌های مقایسه‌ای برای مقایسه رنگ بین مناطق وجود نداشت و بنابراین نتایج بررسی رنگ میکروپلاستیک‌ها به صورت توصیفی گزارش شد.

به طور کلی رنگ غالب میکروپلاستیک‌های شناسایی شده در خاک‌های مناطق مورد مطالعه در استان فارس رنگ سیاه (حدود ۵۱ درصد) بود (شکل ۵). پس از آن، آبی-سورمه‌ای (آبی تیره) در رتبه دوم قرار گرفت (حدود ۲۴ درصد). رنگ‌های سفید-شفاف و قرمز-صورتی سهم‌های بسیار کمتری داشتند (به ترتیب حدود ۸/۵ و ۹/۴ درصد) و رنگ‌های قهوه‌ای-نارنجی و زرد-سبز کمترین فراوانی را نشان دادند (کمتر از ۴ درصد).



شکل ۴- درصد فراوانی رنگ‌های مشاهده شده در میکروپلاستیک‌ها در خاک‌های مناطق چهارگانه مورد مطالعه در استان فارس



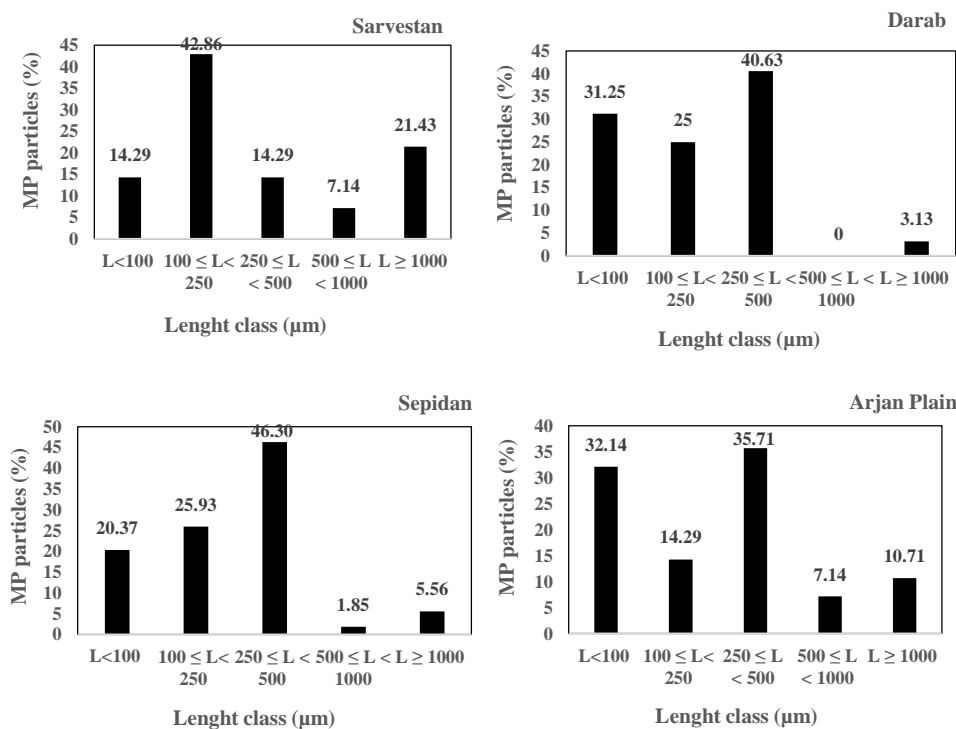
شکل ۵ - درصد فراوانی رنگ میکروپلاستیک‌ها در نمونه‌های خاک‌های سطحی مورد مطالعه در استان فارس

توزیع اندازه‌های مختلف میکروپلاستیک

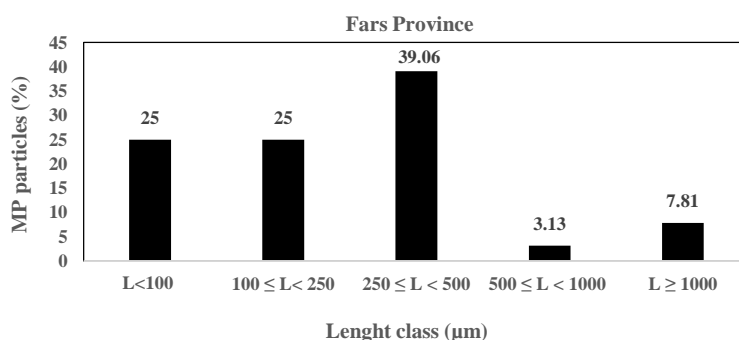
الگوی توزیع اندازه میکروپلاستیک‌های شناسایی شده در خاک‌ها، بین مناطق چهارگانه مورد مطالعه به‌طور قابل توجهی متفاوت بود (شکل ۶). در سپیدان سهم اندازه‌های بزرگ‌تر بیشتر بود و بیشترین درصد مربوط به گروه اندازه‌ای سوم با اندازه ۲۵۰ تا ۵۰۰ میکرومتر (با فراوانی حدود ۴۶ درصد) مشاهده شد. مناطق داراب و ارژن از نظر توزیع اندازه میکروپلاستیک‌ها تقریباً مشابه بودند و سهم اندازه‌های متوسط و کوچک‌تر در آن‌ها غالب بود. به عبارتی سهم گروه‌های اندازه‌ای دوم و سوم به ترتیب با اندازه‌های ۱۰۰ تا ۲۵۰ و ۲۵۰ تا ۵۰۰ میکرومتر حدود ۲۵ تا ۴۰ درصد بود. در مقابل خاک‌های منطقه سروستان، از نظر توزیع اندازه میکروپلاستیک‌ها، رفتار متفاوتی نشان دادند و بیشترین فراوانی (حدود ۴۳ درصد) مربوط به گروه اندازه‌ای دوم (ذرات با اندازه ۱۰۰ تا ۲۵۰ میکرومتر) بود. ذرات میکروپلاستیک بزرگ (با اندازه بزرگتر یا مساوی ۱۰۰۰ میکرومتر) نیز در خاک‌های منطقه سروستان، سهم نسبتاً زیادی (حدود ۲۱ درصد) را به خود اختصاص دادند. بنابراین به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد عمده میکروپلاستیک‌های موجود در خاک‌های مناطق سروستان و سپیدان به ترتیب به گروه‌های اندازه‌ای ۱۰۰ تا ۲۵۰ و ۲۵۰ تا ۵۰۰ میکرومتر اختصاص داشتند. درحالی که عمده میکروپلاستیک‌های موجود در خاک‌های

مناطق داراب و ارژن به گروه اندازه‌های ۲۵۰ تا ۵۰۰ میکرومتر اختصاص داشتند.

نتایج توزیع اندازه ذرات میکروپلاستیک‌ها در خاک‌های مورد مطالعه در استان فارس نشان داد به‌طور کلی بیشترین سهم (حدود ۳۹ درصد) ذرات میکروپلاستیک در گروه اندازه‌های ۲۵۰ تا ۵۰۰ میکرومتر قرار دارند و دو گروه اندازه‌های کمتر از ۱۰۰ میکرومتر و ۱۰۰ تا ۲۵۰ میکرومتر هر کدام سهم نسبتاً مشابه و قابل توجهی داشتند (حدود ۲۵ درصد). در مقابل ذرات بزرگتر از ۵۰۰ میکرومتر بسیار کمتر مشاهده شدند و سهم تجمعی اندازه‌های ذرات میکروپلاستیک بزرگ (بزرگتر از ۵۰۰ میکرومتر) کمتر از ۱۱ درصد بود (شکل ۷). به‌طور کلی نتایج بررسی الگوی اندازه‌های میکروپلاستیک‌ها در خاک‌های مناطق مورد مطالعه استان فارس نشان داد بخش عمده ذرات میکروپلاستیک در کلاس‌های کوچک‌تر قرار می‌گیرند و ذرات با اندازه‌های بزرگ سهم بسیار کمتری دارند.



شکل ۶- توزیع رده‌های اندازه‌های میکروپلاستیک‌ها در خاک‌های چهار منطقه مورد مطالعه (بر حسب درصد) در استان فارس



شکل ۷- توزیع اندازه میکروپلاستیک‌ها در نمونه‌های خاک‌های سطحی مورد مطالعه در استان فارس

ساختار پلیمری (جنس) میکروپلاستیک‌ها

نتایج تجزیه و تحلیل رامان از میکروپلاستیک‌های شناسایی شده در خاک‌های سطحی چهار منطقه مورد مطالعه استان فارس در جدول ۵ خلاصه شده است. بر اساس نتایج آنالیز رامان چندین نوع پلیمر از جمله پلی‌اتیلن، پلی‌اتیلن ترفتالات، پلی‌استایرن، پلی‌پروپیلن، پلی‌آمید، پلی‌دین و نایلون در نمونه‌های خاک سطحی مناطق مورد مطالعه شناسایی شدند. به‌طور کلی، پراکندگی انواع پلیمر در مناطق مختلف

نسبتاً متفاوت بوده و پلی‌اتیلن، پلی‌اتیلن ترفتالات، پلی‌آمید و نایلون از جمله پلیمرهایی بودند که در بیش از یک منطقه مشاهده شدند. نتایج نشان داد در خاک‌های سروستان پلیمر نایلون با فراوانی ۶۶/۶۷ درصد و در خاک‌های سپیدان پلیمر پلی‌آمید با فراوانی ۶۶/۶۷ درصد بیشترین سهم را در بین انواع پلیمر شناسایی شده به خود اختصاص دادند. در خاک‌های داراب تنوع پلیمرهای شناسایی شده زیادتر از سایر مناطق بود ولی پلیمر پلی‌آمید بیشترین سهم (۳۰ درصد) را به خود اختصاص داد. در خاک‌های منطقه ارژن نیز پلیمرهای اتیلن وینیل استات، پلی‌اتیلن ترفتالات و نایلون هر کدام با سهم ۳۳/۳۳ درصد مشاهده شدند. به‌طور کلی نتایج نشان داد در مجموع خاک‌های مورد مطالعه، پلیمرهای نایلون، پلی‌آمید، پلی‌اتیلن و پلی‌اتیلن ترفتالات به ترتیب با مقادیر نسبی ۲۶/۳۲، ۲۶/۳۲، ۱۰/۵۳ و ۱۰/۵۳ درصد بیشترین سهم را در بین پلیمرهای شناسایی شده به خود اختصاص دادند (جدول ۵).

جدول ۵- نوع پلیمرهای شناسایی شده با آنالیز رامان در نمونه‌های خاک سطحی مناطق مورد مطالعه (درصد) به تفکیک منطقه و در کل استان

فارس

مناطق مورد مطالعه					نوع پلیمر
کل استان	سروستان	سپیدان	داراب	دشت ارژن	
۵/۲۶	.	.	.	۳۳/۳۳	اتیلن وینیل استات
۵/۲۶	.	.	۱۰	.	پلی‌استایرن
۱۰/۵۳	۳۳/۳۳	.	۱۰	.	پلی‌اتیلن
۱۰/۵۳	.	.	۱۰	۳۳/۳۳	پلی‌اتیلن ترفتالات
۵/۲۶	.	.	۱۰	.	پلی‌پروپیلن
۲۶/۳۲	.	۶۶/۶۷	۳۰	.	پلی‌آمید
۵/۲۶	.	۳۳/۳۳	.	.	پلی‌دین
۲۶/۳۲	۶۶/۶۷	.	۲۰	۳۳/۳۴	نایلون
۵/۲۶	.	.	۱۰	.	سایر
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	کل

ارتباط فراوانی میکروپلاستیک‌ها با ویژگی‌های خاکی و اقلیمی

نتایج آزمون همبستگی اسپیرمن نشان داد که فراوانی میکروپلاستیک‌ها عمدتاً تحت تأثیر ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک قرار دارد و اثر مستقیم متغیرهای اقلیمی بر آن کم است. از نظر شیمیایی، فراوانی میکروپلاستیک‌ها با سدیم ($r = 0.496, p < 0.01$)، منیزیم ($r = 0.390, p < 0.05$) و بی‌کربنات ($r = 0.472, p < 0.05$) همبستگی مثبت و معنادار نشان داد. از نظر ویژگی‌های فیزیکی خاک نیز فراوانی میکروپلاستیک‌ها با افزایش درصد شن در خاک به طور معنی‌داری ($r = -0.423, p < 0.05$) کاهش یافت. سایر ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک ارتباط معنی‌داری با فراوانی میکروپلاستیک‌ها نداشتند. متغیرهای اقلیمی شامل بارش سالانه ($r = 0.339, p = 0.083$) و دمای سالانه ($r = -0.136, p = 0.499$) نیز همبستگی معناداری با فراوانی میکروپلاستیک‌ها نشان ندادند.

جدول ۶- نتایج آزمون همبستگی اسپیرمن بین فراوانی میکروپلاستیک‌ها و پارامترهای اقلیمی (دما و بارش)

ویژگی‌های اقلیمی/خاکی	ضریب همبستگی (r)	معنی‌داری (p)	وضعیت معنی‌داری
بارش (mm)	۰/۳۳۹	۰/۰۸۳	غیر معنی‌دار
دما (°C)	-۰/۱۳۶	۰/۴۹۹	غیر معنی‌دار
پ‌هاش	-۰/۱۷۷	۰/۳۷۶	غیر معنی‌دار
قابلیت هدایت الکتریکی (dS/m)	-۰/۲۱۱	۰/۲۹۲	غیر معنی‌دار
سدیم (meq/L)	۰/۴۹۶	۰/۰۰۹	معنی‌دار
پتاسیم (meq/L)	-۰/۱۹۶	۰/۳۲۸	غیر معنی‌دار
کلسیم (meq/L)	۰/۳۵۴	۰/۰۷۰	غیر معنی‌دار
منیزیم (meq/L)	۰/۳۹۰	۰/۰۴۴	معنی‌دار
بی‌کربنات (meq/L)	۰/۴۷۲	۰/۰۱۳	معنی‌دار
کربنات کلسیم (%)	-۰/۳۲۳	۰/۱۰۰	غیر معنی‌دار
رس (%)	۰/۱۶۵	۰/۴۱۲	غیر معنی‌دار
شن (%)	-۰/۴۲۳	۰/۰۲۸	معنی‌دار
کربن آلی (%)	۰/۱۴۵	۰/۴۷۰	غیر معنی‌دار

بحث

تحلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نشان داد که مناطق مورد مطالعه از نظر بستر تجمع میکروپلاستیک‌ها کاملاً متمایز هستند. تفاوت آماری معنی‌داری در میزان کربنات کلسیم ($p < 0.05$) و غلبه شرایط آهکی در سروستان و داراب بازتابی از رژیم‌های رطوبتی خشک این مناطق است. در مقابل بیشتر بودن میزان کربن آلی در سپیدان، نه تنها ناشی از کاربری مرتعی و پوشش گیاهی غنی‌تر است، بلکه به عنوان یک عامل کلیدی در به دام انداختن ذرات میکروپلاستیک عمل می‌کند. از سوی دیگر، آلودگی پلاستیکی خود می‌تواند با تخریب یکپارچگی ساختار خاک و ایجاد کانال‌های ترجیحی، نرخ تبخیر را افزایش داده و بر انتقال عمودی آلاینده‌ها تأثیر بگذارد (Wan et al., 2019)، موضوعی که می‌تواند پویایی ذرات را در خاک‌های مناطق خشک (مانند سروستان) تحت تأثیر قرار دهد. علاوه بر اثر غیر مستقیم اقلیم، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که برخی ویژگی‌های خاک نقش مهمی در تجمع میکروپلاستیک‌ها دارند. به طور خاص، افزایش یون‌های سدیم، منیزیم و بی‌کربنات با فراوانی بالاتر میکروپلاستیک‌ها همراه بود، موضوعی که می‌تواند بازتاب دهنده شرایط خاک‌های نیمه خشک و شور باشد. این یافته‌ها با گزارش شینگ و همکاران (۲۰۲۵) هم‌سو است که نشان دادند سطح بار منفی میکروپلاستیک‌ها می‌تواند یون سدیم را جذب کرده و حضور نمک‌ها با کاهش دافعه الکترواستاتیک، مهاجرت میکروپلاستیک را مهار می‌کند (Xing et al., 2025). همچنین حضور بی‌کربنات به عنوان شاخص قلیائیت و شوری، نشان‌دهنده شرایط محیطی است، که در آن تجمع همزمان املاح و میکروپلاستیک‌ها در افق سطحی خاک تشدید می‌شود. در مقابل، همبستگی منفی بین فراوانی میکروپلاستیک و درصد شن ($r = -0.423, p < 0.05$) با قدرت همبستگی متوسط) نشان می‌دهد که با افزایش شن، فراوانی میکروپلاستیک‌ها تمایل به کاهش دارد. همانطور که وانگ و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند، خاک‌های درشت دانه به دلیل نفوذپذیری زیاد، سطح تماس ویژه کم، تخریب ساختار منافذ موئین و کاهش ظرفیت نگهداری، توانایی کمتری برای تجمع و احتباس ذرات ریز (از جمله میکروپلاستیک‌ها) نسبت به خاک‌های ریزدانه دارند (Wang et al., 2023). این یافته با مطالعات میدانی دیگر که بر نقش تعیین‌کننده بافت خاک تأکید دارند، هم‌سو است. به‌عنوان نمونه، یانگ و همکاران (۲۰۲۳) در خاک‌های کشاورزی مناطق کارستی گویژو چین نشان دادند که خاک‌های با بافت ریزتر (مانند رس سبک پودری) آلودگی به مراتب بیشتری به میکروپلاستیک‌ها دارند (Yang et al., 2023). نتیجه معکوس این یافته، یعنی آلودگی کمتر در خاک‌های با بافت درشت‌تر، مستقیماً همبستگی منفی مشاهده شده در پژوهش حاضر را تأیید می‌کند. بنابراین، بافت درشت خاک عملاً نقش یک فیلتر طبیعی را ایفا کرده و از تجمع میکروپلاستیک‌ها در افق سطحی جلوگیری می‌کند.

نتایج این پژوهش نشان داد که در خاک‌های سطحی استان فارس، ذرات میکروپلاستیک با شکل رشته‌ای الگوی غالب را در تمامی مناطق مورد مطالعه تشکیل می‌دهند. مشاهده این الگو در هر چهار منطقه، با وجود تفاوت‌های اقلیمی و کاربری اراضی، بیانگر آن است که منابع ورودی مشترک و ویژگی‌های انتقالی خاص ذرات رشته‌ای نقش مهمی در شکل‌گیری ساختار میکروپلاستیک‌های خاک دارند. رشته‌ای به دلیل نسبت طول به قطر زیاد، وزن کم و سطح تماس زیاد، قابلیت جابجایی بیشتری نسبت به انواع دیگر میکروپلاستیک‌ها دارند و به راحتی می‌توانند از طریق جریان هوا، رواناب سطحی یا فعالیت‌های کشاورزی در محیط پراکنده شوند. چنین الگویی با توجه به نوع منابع محتمل و رفتار انتقالی ذرات رشته‌ای در محیط قابل انتظار است. غلبه مطلق شکل رشته‌ای با فراوانی ۹۱/۴۱٪ در کل مناطق، نشان‌دهنده پایداری و پتانسیل بالای انتقال این شکل هندسی از ذرات در محیط خاک است. این الگو به‌ویژه در سروستان با مشاهده ۱۰۰٪ ذرات رشته‌ای برجسته‌تر می‌شود، وضعیتی که به‌طور مستقیم با شرایط اراضی بایر، فقدان پوشش گیاهی و نزدیکی به حوضه تبخیری دریاچه مهارلو مرتبط است. در چنین محیطی انتقال بادی به عنوان سازوکار غالب، امکان جابجایی ذرات سبک را فراهم می‌کند و موجب تمرکز ذرات رشته‌ای در افق‌های سطحی خاک می‌شود. قابل ذکر است که یک ذره رشته‌ای، بر خلاف یک تکه پلاستیک صاف و سنگین، قابلیت جابجایی بسیار بیشتری دارد، بنابراین غالبیت شکل رشته‌ای در این پژوهش با شرایط فیزیکی محیط و فرآیندهای انتقال جوی هم‌خوانی دارد. نتایج این پژوهش در ارتباط با غلبه شکل رشته‌ای میکروپلاستیک در خاک‌های مورد مطالعه، با نتایج مطالعات انجام شده در کرمانشاه (حسینی و همکاران، ۱۴۰۴) و اهواز (Nematollahi et al., 2022) در ایران، برلین در آلمان (Amato-Lourenço et al., 2025)، اژه و مرمره در ترکیه (Akca et al., 2024) و لاهور در پاکستان (Rafique et al., 2020) هم‌خوانی دارد. امروزه هم صنایع نساجی و هم استفاده روزمره از پوشاک مصنوعی، فرش‌های پلی‌پروپیلنی، طناب‌ها و نخ‌ها سهم بزرگی در ورود ذرات رشته‌ای ریز به محیط دارند. این الگو در مطالعات پیشین نیز به عنوان یکی از مسیرهای اصلی ورود میکروپلاستیک‌ها به خاک گزارش شده است و با نتایج آنها هم‌خوانی دارد؛ به عنوان نمونه در مطالعه جاهدی و همکاران (۲۰۲۵) نیز گزارش شد میکروپلاستیک‌های رشته‌ای بیشترین سهم را در افق‌های سطحی خاک به خود اختصاص داده‌اند (Jahedi et al., 2025).

در مقابل، حضور ذرات صفحه‌ای در داراب (۱۲/۵۰٪) ناشی از تخریب پلاستیک‌های مالچ در کشاورزی منطقه و در سپیدان (۱۱/۱۱٪) ناشی از پسماندهای بسته‌بندی در مناطق تفرجی است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که نوع کاربری اراضی و فعالیت‌های انسانی محلی می‌تواند توزیع مورفولوژیک میکروپلاستیک‌ها را تحت تأثیر قرار دهد، با این حال ذرات رشته‌ای همچنان بخش عمده و پایدار جمعیت میکروپلاستیک‌ها را تشکیل می‌دهند. علاوه بر این با توجه به نقش گزارش شده انتقال جوی، رسوب‌گذاری از طریق جو و انتقال بادی رشته‌های پلیمری نیز می‌تواند یکی از مسیرهای تأمین‌کننده مهم در شکل‌گیری این الگو و غلبه میکروپلاستیک‌های رشته‌ای باشد. برآورد شده است که حدود ۷۰٪ منسوجات جهان از پلیمرهای مصنوعی ساخته شده‌اند؛ بنابراین این منسوجات می‌توانند به عنوان یکی از مهمترین منابع تولید میکروپلاستیک‌های رشته‌ای در خاک شناخته شوند (Razeghi et al., 2021). در مطالعات انجام شده در بخش غربی شیراز نیز بیشترین غلظت میکروپلاستیک‌ها به ورودی‌های ناشی از فعالیت‌های کشاورزی به‌ویژه استفاده از پساب‌های شهری برای آبیاری اراضی زراعی، که یکی از مسیرهای اصلی ورود میکروپلاستیک‌ها به خاک محسوب می‌شود نسبت داده شده است (Rezaei et al., 2022).

تحلیل توزیع اندازه ذرات میکروپلاستیک در خاک‌های سطحی استان فارس نشان داد که بین مناطق چهارگانه مورد مطالعه تفاوت قابل توجهی وجود دارد. در سپیدان بیشترین فراوانی مربوط به گروه اندازه‌ای ۲۵۰ تا ۵۰۰ میکرومتر با سهم حدود ۴۶٪ بود. این غلبه اندازه متوسط می‌تواند بازتابی از فرآیند شست و شوی ذرات ریز به اعماق پایین‌تر توسط بارندگی‌های سنگین (۶۶۱/۶ میلی‌متر) و نفوذ رواناب سطحی باشد و نشان‌دهنده جابجایی و پراکندگی طولانی مدت ذرات ریز در خاک است.

در داراب و دشت ارژن، توزیع اندازه ذرات میکروپلاستیک‌ها تقریباً مشابه بوده و عمده ذرات در گروه‌های ۱۰۰ تا ۵۰۰ میکرومتر (به ویژه ۲۵۰ تا ۵۰۰ میکرومتر) قرار داشتند. این الگو نشان می‌دهد که در این مناطق، اندازه ذرات متوسط غالب بوده و ذرات بزرگتر کمتر دیده می‌شوند. بنابراین، غالب بودن ذرات ریز در این پژوهش می‌تواند نشانه‌ای از ماندگاری و رفتار طولانی مدت میکروپلاستیک‌ها در خاک‌های مورد مطالعه باشد، زیرا مطالعات اخیر نشان داده‌اند که ذرات کوچک میکروپلاستیک در خاک غالب بوده و تحت تأثیر عوامل محیطی مانند فعالیت‌های کشاورزی، بهم‌خوردن‌های زیستی و شستشو، جابجا شده و برای مدت طولانی در محیط باقی می‌مانند (En-Nejmy et al., 2025).

در سروستان توزیع اندازه ذرات رفتاری متفاوت از سایر مناطق نشان داد، بیشترین فراوانی (حدود ۴۳٪ درصد) مربوط به گروه اندازه‌ای ۱۰۰ تا ۲۵۰ میکرومتر بود، اما ذرات بزرگتر یا مساوی ۱۰۰۰ میکرومتر نیز سهم نسبتاً زیادی (حدود ۲۱٪) داشتند. حضور این ذرات درشت، علی‌رغم دمای بالا، حاکی از آن است که در اقلیم‌های خشک و اراضی بایر با محتوی کم کربن آلی، سرعت تخریب زیستی محدود است و ذرات نایلونی درشت‌دانه ماندگاری بیشتری در افق سطحی خاک دارند. این وضعیت همچنین نشان‌دهنده تأثیر مستقیم ویژگی‌های فیزیکی خاک و اقلیم بر پایداری و ماندگاری ذرات بزرگ میکروپلاستیک است. به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهد که ذرات ریز و متوسط (۱۰۰ تا ۵۰۰ میکرومتر) بیشترین سهم را در خاک‌های مورد مطالعه دارند. این وضعیت معمولاً زمانی دیده می‌شود که پلاستیک‌ها مدت بیشتری در محیط بوده و به تدریج تحت اثر عوامل فیزیکی و شیمیایی (مانند نور، دما و سایش) خرد و ریز شده باشند. بنابراین اندازه ذرات به‌طور مستقیم با شرایط اقلیمی، میزان بارش و ویژگی‌های فیزیکی مرتبط است. این یافته‌ها با گزارش‌های سایر مطالعات در ایران و دیگر نقاط جهان همخوانی دارد و اندازه کوچک ذرات می‌تواند منجر به تحرک بیشتر آنها در محیط خاک شود (Zhang et al., 2022).

از نظر رنگ نیز الگوی نسبتاً مشابهی در مناطق مورد بررسی مشاهده شد، به‌طوری که رنگ‌های تیره، به‌ویژه سیاه در اغلب مناطق سهم غالب را به خود اختصاص داد. در مناطق داراب، ارژن و سروستان، رنگ سیاه با فراوانی حدود ۶۲/۵٪ تا ۶۴/۲۹٪ به عنوان رنگ غالب میکروپلاستیک‌های شناسایی‌شده ثبت شد که نشان‌دهنده یک الگوی مشترک در این سه منطقه، علی‌رغم تفاوت‌های اقلیمی و کاربری اراضی است. غلبه رنگ سیاه در این مناطق می‌تواند هم بازتابی از نوع منابع ورودی و هم نتیجه فرآیندهای هوازدگی، اکسیداسیون و فرسایش سطحی پلیمرها در محیط خاک باشد. در این مناطق، به‌ویژه در سروستان و داراب که کاربری کشاورزی و اراضی بایر گسترده‌تر است، منابعی مانند سایش تیر خودروها، احتراق ناقص مواد پلاستیکی و ورود بقایای پلاستیک‌های تیره‌رنگ مورد استفاده در فعالیت‌های کشاورزی و حمل‌ونقل می‌توانند نقش مهمی در شکل‌گیری این الگوی رنگی داشته باشند. نتایج حاضر با یافته‌های حسینی و همکاران (۱۴۰۴) در خاک‌های استان کرمانشاه همخوانی دارد، جایی که رنگ سیاه به عنوان رنگ غالب در بین میکروپلاستیک‌های خاک گزارش شد. الگوی مشابهی نیز در مطالعات انجام شده در گوئژو چین (Zhang et al., 2024) و گانگ دونگ کره جنوبی (Yoon et al., 2024) گزارش شد. در این مطالعات، سایش لاستیک تایرها به‌عنوان منبع عمده میکروپلاستیک‌های سیاه و همچنین کاربرد گسترده پلاستیک‌های تیره رنگ در حوزه‌هایی مانند بسته‌بندی، صنایع الکترونیک و ساخت قطعات خودرو به عنوان منابع اصلی این ذرات معرفی شدند (Huang



(& Xu., 2022; Reynolds et al., 2024).

در مقابل، منطقه سپیدان الگوی رنگی تا حدی متفاوت را نشان داد، به طوری که سهم ذرات آبی-سورمه‌ای در این منطقه به طور محسوسی بیشتر (حدود ۳۵/۱۹٪) بود. این تفاوت می‌تواند بازتابی از شرایط اقلیمی خاص سپیدان، از جمله اقلیم کوهستانی، بارندگی زیاد و کاربری غالب مرتعی-گردشگری باشد. در چنین شرایطی، احتمال ورود میکروپلاستیک‌ها از منابعی مانند پوشاک مصنوعی، تجهیزات فضای باز، پسماندهای بسته‌بندی و فعالیت‌های تفریحی افزایش می‌یابد که اغلب با رنگ‌های آبی و تیره همراه هستند. بنابراین، الگوی رنگی مشاهده‌شده در سپیدان نشان می‌دهد که در کنار فرآیندهای عمومی هوازدگی، نوع فعالیت‌های انسانی محلی می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییر ترکیب رنگ میکروپلاستیک‌های خاک داشته باشد. برای نمونه مطالعه‌ای بر خاک‌های زراعی شهر دارالسلام نیز نشان داد که رنگ‌های غالب سفید و آبی بازتابی از منابع ورودی خاص آن محیط شهری هستند (Kato et al., 2024). به‌طور کلی، غلبه رنگ سیاه در خاک‌های استان فارس بیانگر آن است که اگرچه شرایط اقلیمی و کاربری اراضی می‌توانند بر تنوع رنگی میکروپلاستیک‌ها اثر بگذارند، اما منابع غالب ورود و فرآیندهای فرسایش و هوازدگی پلیمرها موجب شکل‌گیری یک الگوی رنگی نسبتاً پایدار در مقیاس منطقه‌ای شده‌اند، الگویی که در مطالعات داخلی و بین‌المللی نیز به‌طور مکرر گزارش شده است. به‌طور مثال در خاک‌های کشاورزی شهرستان ری، رنگ‌های سیاه و سفید با هم حدود ۸۳٪ از میکروپلاستیک‌ها را تشکیل می‌دهند که در آن رنگ سیاه با سهم ۴۲/۷٪، غالب‌ترین رنگ گزارش شده است (Mozaffarghadirli et al., 2024).

نتایج طیف‌سنجی رامان نشان داد که ترکیب پلیمری میکروپلاستیک‌ها در چهار منطقه استان فارس از نظر نوع و فراوانی پلیمرها تفاوت محسوسی دارد، هر چند برخی از پلیمرها از جمله پلی‌اتیلن، پلی‌اتیلن ترفتالات، پلی‌آمید و نایلون در بیش از یک منطقه مشاهده شدند که بیانگر وجود منابع ورودی مشابه در مقیاس منطقه‌ای است. این تنوع پلیمری نشان می‌دهد که حتی در مناطق غیرشهری نیز منابع متعددی در ورود میکروپلاستیک‌ها به خاک نقش دارند. چنین الگویی با نتایج مطالعات پیشین هم‌خوانی دارد که نشان می‌دهند پلیمرهای با مصرف گسترده، به‌ویژه پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن و پلی‌آمید، سهم عمده‌ای از میکروپلاستیک‌های خاک را تشکیل می‌دهند (Liu et al., 2023; Cao et al., 2021; Leitão et al., 2019). در منطقه سپیدان فراوانی پلی‌آمید (۶۶/۶۷٪) و رنگ‌های تیره (آبی-سورمه‌ای) با کاربری مرتعی-تفرجگاهی این منطقه سازگار است، چرا که پلی‌آمید، پلیمر اصلی در تولید پوشاک و تجهیزات فضای باز است. این الگو با نتایج مطالعات پیشین که سهم بالای پلیمرهای مرتبط با منسوجات در محیط‌های کم‌تراکم و نیز در خاک‌های شهری و نیمه طبیعی گزارش کرده‌اند هم‌راستا می‌باشد (Cao et al., 2021; Leitão et al., 2023). در مقابل، در خاک‌های سروستان غلبه نایلون (۶۶/۶۷٪) مشاهده شد که با شرایط اقلیمی خشک، اراضی بایر و شدت بالای تابش خورشیدی هم‌خوانی دارد و می‌تواند بازتابی از سایش تاپرها و مقاومت بیشتر نایلون در برابر تخریب در این شرایط باشد. نایلون به‌عنوان پلیمری مقاوم در برابر تخریب، به‌ویژه در شرایطی با فعالیت زیستی کم، ماندگاری بیشتری در افق‌های سطحی خاک دارد. اهمیت زیست‌محیطی این الگو با توجه به گزارش‌های مربوط به سمیت بیشتر الیاف نایلونی و پتانسیل انتقال آن‌ها به اکوسیستم‌های آبی قابل توجه است (Albarano et al., 2024; Thapliyal et al., 2025). منطقه داراب تنوع پلیمری بیشتری را نشان داد، به طوری که پلی‌آمید با سهم حدود ۳۰ درصد همچنان پلیمر غالب بود؛ الگویی که احتمالاً ناشی از ترکیب فعالیت‌های کشاورزی و مصرف محصولات پلاستیکی و ورود پسماندهای پلاستیکی متنوع در این منطقه است، موضوعی که با یافته‌های گزارش‌شده در خاک‌های کشاورزی، به‌ویژه در ارتباط با تخریب فیلم‌های پلی‌اتیلنی، هم‌خوانی دارد (Liu et al., 2019; Zhang et al., 2020). در منطقه ارزن نیز حضور هم‌زمان نایلون، پلی‌اتیلن ترفتالات و اتیلن وینیل استات با سهم‌های مشابه، بیانگر تنوع منابع ورودی و نقش عوامل محلی در ترکیب پلیمری میکروپلاستیک‌ها است. چنین تنوعی در ترکیب پلیمرها، پیش‌تر نیز در مطالعات مربوط به خاک‌های شهری و نیمه‌طبیعی گزارش شده و نشان‌دهنده منشأهای چندگانه آلودگی پلاستیکی در مقیاس محلی است (Cao et al., 2023; Leitão et al., 2021). در مجموع، نتایج طیف‌سنجی رامان در این پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه الگوی کلی پلیمرهای غالب با ادبیات جهانی هم‌خوانی دارد، اما تفاوت‌های مشاهده‌شده بین مناطق چهارگانه استان فارس به‌وضوح بازتاب‌دهنده نقش اقلیم، کاربری اراضی و نوع فعالیت‌های انسانی در شکل‌دهی ترکیب پلیمری میکروپلاستیک‌های خاک است. هرچند نتایج آزمون همبستگی اسپیرمن نشان داد که بین فراوانی میکروپلاستیک‌ها و متغیرهای اقلیمی دما و بارش رابطه معنی‌داری وجود ندارد، اما مقایسه چهار منطقه اقلیمی مورد مطالعه بیانگر تفاوت‌های مشخص در الگوی توزیع اندازه و ویژگی‌های مورفولوژیک ذرات است. این موضوع نشان می‌دهد که اقلیم بیش از آنکه کنترل‌کننده مستقیم تعداد میکروپلاستیک‌ها باشد، از طریق اثرگذاری بر فرآیندهایی مانند رواناب، فرسایش سطحی، پویایی رسوبات و شرایط ماندگاری ذرات در خاک، نقش غیرمستقیم در بازتوزیع و تجمع آنها ایفا می‌کند. به‌ویژه در مناطق پرباران‌تر مانند

سپیدان و ارژن، نقش بارش در انتقال ذرات از واحدهای بالادست و تجمع در خاک‌های سطحی محتمل‌تر به نظر می‌رسد، در حالی که در مناطق خشک‌تر مانند سروستان، حضور میکروپلاستیک‌ها بیشتر بازتابی از منابع ورودی موضعی و فعالیت‌های انسانی است. چنین الگویی با نتایج مطالعات میدانی در مقیاس منطقه‌ای نیز هم‌خوانی دارد، به طوری که در یک بررسی گسترده بر خاک‌های با کاربری‌های مختلف نشان داده شد که فراوانی میکروپلاستیک‌ها الزاماً تحت کنترل مستقیم عوامل اقلیمی یا مکانی (مانند فاصله از مناطق شهری، جاده‌ها و فعالیت‌های معدنی) نیست و توزیع این ذرات بیشتر تابع ویژگی‌های بستر خاک و نوع کاربری اراضی است (Corradini et al., 2021).

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که خاک‌های سطحی چهار منطقه اقلیمی استان فارس از نظر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و همچنین از نظر توزیع و ویژگی‌های مورفولوژیک میکروپلاستیک‌ها تفاوت‌های قابل توجهی دارند. این تفاوت‌ها در چارچوب شرایط اقلیمی، زمین‌شناسی، نوع کاربری اراضی و مدیریت خاک قابل تبیین است. واکنش خاک‌ها در تمامی مناطق در محدوده خنثی تا کمی قلیایی قرار داشت و شوری عموماً کم تا متوسط بود؛ با این حال اختلاف معنی‌دار در مقادیر کربنات کلسیم، کاتیون‌های محلول و بافت خاک نشان داد که شرایط اقلیمی متفاوت مناطق، از طریق تأثیر بر فرآیندهای هوازدگی، تجمع کربنات‌ها و تکامل خاک، نقش مهمی در شکل‌گیری ویژگی‌های خاکی ایفا کرده است. میکروپلاستیک‌ها در خاک با رنگ‌ها، اشکال و اندازه‌های گوناگون یافت می‌شوند و منشأ آنها می‌تواند فعالیت‌های خانگی، کشاورزی، حمل و نقل و حتی رسوبات ناشی از طوفان‌های گرد و غبار باشد. نتایج مطالعه حاضر که با هدف توصیف ویژگی‌های میکروپلاستیک در چهار منطقه استان فارس انجام شد، نشان داد که شکل غالب میکروپلاستیک‌های موجود در خاک، عمدتاً از نوع رشته‌ای است و سهم اشکال صفحه‌ای و سایر اشکال بسیار محدودتر است. توزیع رنگ نیز نشان‌دهنده غلبه رنگ‌های تیره به ویژه سیاه، و پس از آن آبی-سورمه‌ای بود که با ماهیت منابع بالقوه و روند هوازدگی پلیمرها در محیط خاک هم‌خوانی دارد. همچنین بخش عمده ذرات در کلاس اندازه‌ای کوچک (به‌ویژه ۲۵۰ تا ۵۰۰ میکرومتر) قرار داشتند که می‌تواند بازتابی از ماندگاری و خردشدگی تدریجی ذرات در سطح خاک باشد. از نظر ترکیب پلیمر نیز نایلون و پلی‌آمید فراوان‌ترین ساختارهای شناسایی شده بودند. الگوی مشاهده شده نشان می‌دهد که میکروپلاستیک‌ها در لایه‌های سطحی خاک در تمام مناطق استان فارس تثبیت شده‌اند و خاک سطحی به‌عنوان مخزن این ذرات عمل می‌کند. نتایج همبستگی اسپیرمن نشان داد که ارتباط مستقیم فراوانی میکروپلاستیک‌ها با دما و بارش معنی‌دار نیست، اما اقلیم به‌صورت غیرمستقیم از طریق رواناب، فرسایش سطحی و تجمع رسوبات بر توزیع اندازه و ویژگی‌های مورفولوژیک ذرات به‌ویژه در مناطق پرباران‌تر مانند سپیدان و ارژن تأثیر دارد. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده با نمونه‌برداری یکنواخت امکان مقایسه دقیق‌تر بین کاربری‌ها و مناطق اقلیمی را فراهم کنند و منشأ ورود ذرات به خاک و زیست محیط‌های مرتبط بررسی شود.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه شیراز انجام شد. حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه شیراز، دانشکده کشاورزی در قالب پژوهانه پایان‌نامه دانشجویی نویسنده اول و همچنین پژوهانه برای سایر نویسندگان انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها: شکوفه فروزان، سید علی اکبر موسوی، سجاد عباسی، مجید باقرنژاد؛ تهیه گزارش پژوهش: شکوفه فروزان، سید علی اکبر موسوی، سجاد عباسی؛ تحلیل داده‌ها: شکوفه فروزان، سید علی اکبر موسوی، سجاد عباسی، مجید باقرنژاد

مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از پایان‌نامه تقریباً به شکل زیر باشد:

نویسنده اول: دانشجو؛ تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله

نویسنده دوم: استاد راهنمای رساله، طراحی پژوهش، نظارت بر انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله
نویسنده سوم: استاد راهنمای رساله، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، مطالعه و بازبینی مقاله
نویسنده چهارم: استاد مشاور رساله، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله.



اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش در هیچ مرحله‌ای از هوش مصنوعی استفاده نشده است.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شیراز / مرکز مطالعات محیط زیست و آلاینده‌های نوظهور به خاطر حمایت مالی و حمایت معنوی در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

- حسینی، هوشیار، احمدی، مریم، آزادی، فرید، حسینی، هیوا و نوری، منیره. (۱۴۰۴). بررسی حضور میکروپلاستیک‌ها در خاک مناطق مختلف شهر کرمانشاه؛ کمیت و کیفیت میکروپلاستیک‌ها و ارزیابی ریسک. *مجله دانشکده علوم پزشکی ساوه*، ۱(۲)، ۳۸-۵۱.
- انجوی‌نژاد، سید محمود. (۱۴۰۲). بررسی شکل‌های پتاسیم در ردیف‌های پستی و بلندی برخی خاک‌های استان فارس با استفاده از روش طیف سنجی مادون قرمز نزدیک (رساله دکتری، دانشگاه شیراز).
- دهقانی، سمانه و یونسینان، مسعود. (۱۴۰۲). میکروپلاستیک و سلامت انسان: درک خطرات و پیامدها. *مجله اپیدمیولوژی ایران*، ۱۹(۴)، ۳۴۱-۳۴۶.
- سازمان جهاد کشاورزی استان فارس. (۱۳۹۹). *اطلس اراضی کشاورزی شهرستان سروستان*. گزارش سازمانی، شیراز.
- موسوی، سید علی. (۱۳۸۸). بررسی نقش جاذبه‌ها و توانمندی‌های گردشگری سپیدان در جذب گردشگران (پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان).

REFERENCES

- Abbasi, S., Keshavarzi, B., Moore, F., Turner, A., Kelly, F. J., Dominguez, A. O., & Jaafarzadeh, N. (2019). Distribution and potential health impacts of microplastics and microrubbers in air and street dust from Asaluyeh County, Iran. *Environmental Pollution*, 244, 153-164. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.039>
- Abtahi, A. (1980). Soil genesis as affected by topography and time in highly calcareous parent materials under semiarid conditions in Iran. *Soil Science Society of America Journal*, 44 (2), 329-336.
- Akca, M. O., Gündoğdu, S., Akca, H., Delialioğlu, R. A., Aksit, C., Turgay, O. C., & Harada, N. (2024). An evaluation on microplastic accumulations in Turkish soils under different land uses. *Science of the Total Environment*, 911, 168609.
- Albarano, L., Maggio, C., La Marca, A., Iovine, R., Lofrano, G., Guida, M., ... & Libralato, G. (2024). Risk assessment of natural and synthetic fibers in aquatic environment: A critical review. *Science of the Total Environment*, 934, 173398.
- Al-Kaisi, M. M., Lal, R., Olson, K. R., & Lowery, B. (2017). Fundamentals and functions of soil environment. In M. M. Al-Kaisi & B. Lowery (Eds.), *Soil health and intensification of agroecosystems* (Chapter 1, pp. 1-23). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805317-1.00001-4>
- Álvarez-Lopez-tello, J., Robles, C., & del Castillo, R. F. (2021). Microplastic pollution in neotropical rainforest, savanna, pine plantations, and pasture soils in lowland areas of Oaxaca, Mexico: preliminary results. *Ecological Indicators*, 121, 107084.
- Amato-Lourenço, L. F., Bertoldi, C., van Praagh, M., & Rillig, M. (2025). Airborne microplastic deposition in the soil of urban allotment gardens. *Environmental Pollution*, 126372.
- Baensch-Baltruschat, B., Kocher, B., Kochleus, C., Stock, F., & Reifferscheid, G. (2021). Tyre and road wear particles: A calculation of generation, transport and release to water and soil with special regard to German roads. *Science of the Total Environment*, 752, 141939.
- Banwart, S. A., Nikolaidis, N. P., Zhu, Y. G., Peacock, C. L., & Sparks, D. L. (2019). Soil functions:

- Connecting earth's critical zone. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 47(1), 333-359.
- Bergmann, M., Mützel, S., Primpke, S., Tekman, M. B., Trachsel, J., & Gerdt, G. (2019). White and wonderful? Microplastics prevail in snow from the Alps to the Arctic. *Science Advances*, 5(8), eaax1157. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax1157>
- Bi, D., Wang, B., Li, Z., Zhang, Y., Ke, X., Huang, C., Liu, W., Luo, Y., Christie, P., & Wu, L. (2023). Occurrence and distribution of microplastics in coastal plain soils under three land-use types. *Science of the Total Environment*, 855, 159023.
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal*, 54(5), 464-465. <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). *The nature and properties of soils* (15th Ed.). Pearson.
- Braun, M., Mail, M., Heyse, R., & Amelung, W. (2021). Plastic in compost: Prevalence and potential input into agricultural and horticultural soils. *Science of the Total Environment*, 760, 143335.
- Cao, L., Wu, D., Liu, P., Hu, W., Xu, L., Sun, Y., ... & Khim, J. S. (2021). Occurrence, distribution and affecting factors of microplastics in agricultural soils along the lower reaches of Yangtze River, China. *Science of the Total Environment*, 794, 148694.
- Carlin, J., Craig, C., Little, S., Donnelly, M., Fox, D., Zhai, L., & Walters, L. (2020). Microplastic accumulation in the gastrointestinal tracts in birds of prey in central Florida, USA. *Environmental Pollution*, 264, 114633.
- Corradini, F., Casado, F., Leiva, V., Huerta-Lwanga, E., & Geissen, V. (2021). Microplastics occurrence and frequency in soils under different land uses on a regional scale. *Science of the Total Environment*, 752, 141917.
- de Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S., & Rillig, M. C. (2018). Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 24(4), 1405-1416.
- de Souza Machado, A. A., Lau, C. W., Till, J., Kloas, W., Lehmann, A., Becker, R., & Rillig, M. C. (2018). Impacts of microplastics on the soil biophysical environment. *Environmental Science & Technology*, 52(17), 9656-9665. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>
- Dehghani, S., Moore, F., & Akhbarizadeh, R. (2017). Microplastic pollution in deposited urban dust, Tehran metropolis, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 20360-20371.
- Dehghani, S., & Yunesian, M., (2024). Microplastics and human health: Understanding risks and consequences. *Iranian Journal of Epidemiology*, 19(4), 341-346. (In Persian)
- Dong, S., Xia, J., Sheng, L., Wang, W., Liu, H., & Gao, B. (2021). Transport characteristics of fragmental polyethylene glycol terephthalate (PET) microplastics in porous media under various chemical conditions. *Chemosphere*, 276, 130214.
- Dris, R., Gasperi, J., Rocher, V., Saad, M., Renault, N., & Tassin, B. (2015). Microplastic contamination in an urban area: A case study in Greater Paris. *Environmental Chemistry*, 12(5), 592-599.
- Ekebaf, L. O., Ogbefun, D. E., & Okieimen, F. E. (2011). Polymer applications in agriculture. *Biokemistri*, 23(2).
- Enjavinezhad, Sayyed Mahmoud. (2023). *Investigation of potassium forms in elevation sequences of some soils of Fars province using near-infrared spectroscopy* (Doctoral dissertation, Shiraz University). (In Persian)
- En-Nejmy, K., Hayany, B. E., Al-Alawi, M., Jemo, M., Hafidi, M., & El Fels, L. (2024). Microplastics in soil: A comprehensive review of occurrence, sources, fate, analytical techniques and potential impacts. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 288, 117332.
- Eo, S., Hong, S. H., Song, Y. K., Han, G. M., & Shim, W. J. (2019). Spatiotemporal distribution and annual load of microplastics in the Nakdong River, South Korea. *Water Research*, 160, 228-237. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.053>
- Fars Agricultural Jihad Organization. (2020). Atlas of agricultural lands of Sarvestan city. *Organizational Report, Shiraz*. (In Persian)
- Feng, Z., Zhang, T., Li, Y., He, X., Wang, R., Xu, J., & Gao, G. (2019). The accumulation of microplastics in fish from an important fish farm and mariculture area, Haizhou Bay, China. *Science of the Total Environment*, 696, 133948. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133948>
- Fu, Z., & Wang, J. (2019). Current practices and future perspectives of microplastic pollution in freshwater ecosystems in China. *Science of the Total Environment*, 691, 697-712. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.167>
- Galloway, T. S., Cole, M., & Lewis, C. (2017). Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. *Nature Ecology & Evolution*, 1(5), 0116.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science*



Advances, 3(7), e1700782.

- Guo, J. J., Huang, X. P., Xiang, L., Wang, Y. Z., Li, Y. W., Li, H., ... & Wong, M. H. (2020). Source, migration and toxicology of microplastics in soil. *Environment International*, 137, 105263.
- He, X., Qian, Y., Li, Z., Yang, S., Tian, J., Wang, Q., ... & Feng, C. (2023). Identification of factors influencing the microplastic distribution in agricultural soil on Hainan Island. *Science of the Total Environment*, 874, 162426.
- Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C., & Thiel, M. (2012). Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification. *Environmental Science & Technology*, 46(6), 3060-3075.
- Horton, A. A., Walton, A., Spurgeon, D. J., Lahive, E., & Svendsen, C. (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, 127-141.
- Hosseini, H., Ahmadi, M., Azadi, F., Hosseini, H., & Nouri, M (2025). Investigation of microplastics in soils of different areas of Kermanshah city; quantity and quality of microplastics and risk assessment. *Journal of Saveh University of Medical Sciences*, 1(2), 38-51. (In Persian)
- Hou, J., Zhang, Y., Wang, J., Liu, X., Wang, W., & He, G. (2021). Toxicity of microplastics and nanoplastics in mammalian systems. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(16), 8715.
- Huang, Y., & Xu, E. G. (2022). Black microplastic in plastic pollution: Undetected and underestimated? *Water Emerging Contaminants & Nanoplastics*, 1(3), 14.
- Huang, Y., Liu, Q., Jia, W., Yan, C., & Wang, J. (2020). Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment. *Environmental Pollution*, 260, 114096. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114096>
- Jahedi, F., Dehbandi, R., Talepour, N., Jaafarzadeh Haghighi Fard, N., Ravanbakhsh, M., Jorfi, S., ... & Maleki, R. (2025). Abundance, distribution, and ecological risks of microplastics in urban and agricultural topsoil of Mian-Ab Plain, Iran. *Discover Applied Sciences*, 7(7), 667.
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., & Andrady, A. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768-771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
- Kannan, K., & Vimalkumar, K. (2021). A review of human exposure to microplastics and insights into microplastics as obesogens. *Frontiers in Endocrinology*, 12, 724989.
- Kato, E. T., Katima, Z. J., & Minja, R. J. (2024). Vertical distribution of microplastics in urban farmland soils. A case of Mabibo Bonde La Mchicha farm, Dar Es Salaam, Tanzania. *Environmental Advances*, 17, 100558.
- Kim, S. K., Kim, J. S., Lee, H., & Lee, H. J. (2021). Abundance and characteristics of microplastics in soils with different agricultural practices: Importance of sources with internal origin and environmental fate. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123997.
- Lechner, A., Keckeis, S., & Schluep, M. (2014). Microplastics in freshwater systems: A review of the sources, occurrences, and impacts on aquatic life. *Science of the Total Environment*, 466, 1366-1378. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.054>
- Leitão, I. A., Van Schaik, L., Ferreira, A. J. D., Alexandre, N., & Geissen, V. (2023). The spatial distribution of microplastics in topsoils of an urban environment—Coimbra city case-study. *Environmental Research*, 218, 114961.
- Li, W., Luo, Y., & Pan, X. (2020). Microplastics in agricultural soils. In D. He & Y. Luo (Eds.), *Microplastics in terrestrial environments: Emerging contaminants and major challenges* (pp. 63-76). Springer.
- Liu, E. K., He, W. Q., & Yan, C. R. (2014). 'White revolution' to 'white pollution'—Agricultural plastic film mulch in China. *Environmental Research Letters*, 9(9), 091001.
- Liu, K., Wang, X., Fang, T., Xu, P., Zhu, L., & Li, D. (2019). Source and potential risk assessment of suspended atmospheric microplastics in Shanghai. *Science of the Total Environment*, 675, 462-471. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.110>
- Loeppert, R. H., & Suarez, D. L. (1996). Carbonate and gypsum. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3—Chemical methods* (pp. 437-474). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c15>
- Mozaffarghadirli, M., Rafiee, M., Eslami, A., & Abbasi, S. (2024). Microplastic abundance and heavy metal contamination in agricultural soil with the wastewater treatment plants effluent; Tehran, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 83(16), 483.
- Mousavi, S. A. (2009). Investigating the role of attractions and tourism capabilities of Sepidan in attracting

- tourists [*Master's thesis, University of Isfahan*]. (In Persian)
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3—Chemical methods* (Vol. 5, pp. 961-1010). Soil Science Society of America.
- Nelson, R. E. (1983). Carbonate and gypsum. In A. L. Page (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 2—Chemical and microbiological properties* (2nd ed., Vol. 9, pp. 181-197). American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c11>
- Nematollahi, M. J., Keshavarzi, B., Mohit, F., Moore, F., & Busquets, R. (2022). Microplastic occurrence in urban and industrial soils of Ahvaz metropolis: A city with a sustained record of air pollution. *Science of the Total Environment*, 819, 152051.
- Nie, H., Wang, J., Xu, K., Huang, Y., & Yan, M. (2019). Microplastic pollution in water and fish samples around Nanxun Reef in Nansha Islands, South China Sea. *Science of the Total Environment*, 696, 134022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134022>
- Nuelle, M. T., Dekiff, J. H., Remy, D., & Fries, E. (2014). A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments. *Environmental Pollution*, 184, 161-169.
- Okoffo, E. D., Donner, E., McGrath, S. P., Tschärke, B. J., O'Brien, J. W., O'Brien, S., ... & Thomas, K. V. (2021). Plastics in biosolids from 1950 to 2016: A function of global plastic production and consumption. *Water Research*, 201, 117367.
- Oliveri Conti, G., Ferrante, M., Banni, M., Favara, C., Nicolosi, I., Cristaldi, A., Fiore, M., & Zuccarello, P. (2020). Micro- and nano-plastics in edible fruit and vegetables. The first diet risks assessment for the general population. *Environmental Research*, 187, 109677. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109677>
- Page, A. L., Miller, R. H., & Keeney, D. R. (Eds.). (1982). *Methods of soil analysis: Part 2. Chemical and microbiological properties* (2nd ed.). American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.
- Pi, H., Sharratt, B., & Lei, J. (2017). Windblown sediment transport and loss in a desert–oasis ecotone in the Tarim Basin. *Scientific Reports*, 7(1), 7723.
- Pivokonsky, M., Cermakova, L., Novotna, K., Peer, P., Cajthaml, T., & Janda, V. (2018). Occurrence of microplastics in raw and treated drinking water. *Science of the Total Environment*, 643, 1644-1651.
- Prata, J. C., da Costa, J. P., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. (2019). Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 110, 150-159.
- Prata, J. C., da Costa, J. P., Lopes, I., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. (2020). Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects. *Science of the Total Environment*, 702, 134455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134455>
- Qiu, Y., Zhou, S., Qin, W., Zhang, C., Lv, C., & Zou, M. (2023). Effects of land use on the distribution of soil microplastics in the Lihe River watershed, China. *Chemosphere*, 324, 138292.
- Rafique, A., Irfan, M., Mumtaz, M., & Qadir, A. (2020). Spatial distribution of microplastics in soil with context to human activities: A case study from the urban center. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(11), 671.
- Razeghi, N., Hamidian, A. H., Wu, C., Zhang, Y., & Yang, M. (2021). Scientific studies on microplastics pollution in Iran: An in-depth review of the published articles. *Marine Pollution Bulletin*, 162, 111901.
- Reynolds, R. L., Molden, N., Kokaly, R. F., Lowers, H., Breit, G. N., Goldstein, H. L., ... & Derry, J. (2024). Microplastic and associated black particles from road-tire wear: Implications for radiative effects across the cryosphere and in the atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129(19), e2024JD041116.
- Rezaei, M., Abbasi, S., Pourmahmood, H., Oleszczuk, P., Ritsema, C., & Turner, A. (2022). Microplastics in agricultural soils from a semi-arid region and their transport by wind erosion. *Environmental Research*, 212, 113213.
- Richards, L. A. (Ed.). (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils* (USDA Agriculture Handbook No. 60). U.S. Department of Agriculture.
- Rillig, M. C. (2012). Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? *Environmental Science & Technology*, 46(12), 6453-6454.
- Rillig, M. C., Ingraffia, R., & de Souza Machado, A. A. (2017). Microplastic incorporation into soil in agroecosystems. *Frontiers in plant science*, 8, 1805.
- Rillig, M. C., Ziersch, L., & Hempel, S. (2017). Microplastic transport in soil by earthworms. *Scientific Reports*, 7(1), 1362. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01594-7>
- Singh, N., Abdullah, M. M., Ma, X., & Sharma, V. K. (2023). Microplastics and nanoplastics in the soil-plant



- nexus: Sources, uptake, and toxicity. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 53(18), 1613-1642.
- Tang, K. H. D., Li, R., Li, Z., & Wang, D. (2024). Health risk of human exposure to microplastics: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 22(3), 1155-1183.
- Thapliyal, C., Negi, S., Nagarkoti, S., & Daverey, A. (2025). Mechanistic insight into potential toxic effects of microplastics and nanoplastics on human health. *Discover Applied Sciences*, 7(6), 645.
- Thomas, D., Schütze, B., Heinze, W. M., & Steinmetz, Z. (2020). Sample preparation techniques for the analysis of microplastics in soil—A review. *Sustainability*, 12(21), 9074.
- Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3—Chemical methods* (Vol. 5, pp. 475-490). Soil Science Society of America.
- Thompson, R. C., Swan, S. H., Moore, C. J., & Vom Saal, F. S. (2009). Our plastic age. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1973-1976.
- Van den Berg, P., Huerta-Lwanga, E., Corradini, F., & Geissen, V. (2020). Sewage sludge application as a vehicle for microplastics in eastern Spanish agricultural soils. *Environmental Pollution*, 261, 114198.
- Wan, Y., Wu, C., Xue, Q., & Hui, X. (2019). Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Science of the Total Environment*, 654, 576-582.
- Wang, Z., Li, W., Li, W., Yang, W., & Jing, S. (2023). Effects of microplastics on the water characteristic curve of soils with different textures. *Chemosphere*, 317, 137762. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137762>
- Wright, S. L., & Kelly, F. J. (2017). Plastic and human health: A micro issue? *Environmental Science & Technology*, 51(12), 6634-6647. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00423>
- Wu, W. M., Yang, J., & Criddle, C. S. (2017). Microplastics pollution and reduction strategies. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 11(1), 1-4. <http://dx.doi.org/10.1007/s11783-017-0897-7>
- Xing, X., Feng, H., Jiao, S., Xia, T., Li, D., Zhao, F., & Wang, W. (2025). Soil water, salt, and microplastics interact during migration: Performance and mechanism. *Geoderma*, 455, 117229. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117229>
- Xu, B., Liu, F., Cryder, Z., Huang, D., Lu, Z., He, Y., ... & Xu, J. (2020). Microplastics in the soil environment: Occurrence, risks, interactions and fate—A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(21), 2175-2222.
- Yang, D., Shi, H., Li, L., Li, J., Jabeen, K., & Kolandhasamy, P. (2015). Microplastic pollution in table salts from China. *Environmental Science & Technology*, 49(22), 13622-13627.
- Yang, L., Zhang, Y., Kang, S., Wang, Z., & Wu, C. (2021). Microplastics in soil: A review on methods, occurrence, sources, and potential risk. *Science of the Total Environment*, 780, 146546.
- Yang, X., Zhang, Z., & Guo, X. (2023). Impact of soil structure and texture on occurrence of microplastics in agricultural soils of karst areas. *Science of the Total Environment*, 902, 166189.
- Yoon, J. H., Kim, B. H., & Kim, K. H. (2024). Distribution of microplastics in soil by types of land use in metropolitan area of Seoul. *Applied Biological Chemistry*, 67(1), 15.
- Zhang, F., Yang, X., & Zhang, Z. (2024). Effects of soil properties and land use patterns on the distribution of microplastics: A case study in southwest China. *Journal of Environmental Management*, 356, 120598.
- Zhang, G. S., Zhang, F. X., & Li, X. T. (2019). Effects of polyester microfibrils on soil physical properties: Perception from a field and a pot experiment. *Science of the Total Environment*, 670, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.149>
- Zhang, H., Huang, Y., An, S., Zhao, J., Xiao, L., Li, H., & Huang, Q. (2022). Microplastics trapped in soil aggregates of different land-use types: A case study of Loess Plateau terraces, China. *Environmental Pollution*, 310, 119880.
- Zhang, J., Ding, W., Wang, S., Ha, X., Zhang, L., Zhao, Y., ... & Chen, Y. (2024). Pollution characteristics of microplastics in greenhouse soil profiles with the long-term application of organic compost. *Resources, Environment and Sustainability*, 17, 100165.
- Zhang, L., Xie, Y., Liu, J., Zhong, S., Qian, Y., & Gao, P. (2020). An overlooked entry pathway of microplastics into agricultural soils from application of sludge-based fertilizers. *Environmental Science & Technology*, 54(7), 4248-4255. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07905>
- Zhang, S., Bao, A., Lin, X., Jia, G., & Zhang, Q. (2023). Microplastic accumulation in agricultural soils with different mulching histories in Xinjiang, China. *Sustainability*, 15(6), 5438.
- Zhang, S., Liu, X., Hao, X., Wang, J., & Zhang, Y. (2020). Distribution of low-density microplastics in the mollisol farmlands of northeast China. *Science of the Total Environment*, 708, 135091. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135091>

- Zhang, X., Chen, Y., Li, X., Zhang, Y., Gao, W., Jiang, J., ... & He, D. (2022). Size/shape-dependent migration of microplastics in agricultural soil under simulative and natural rainfall. *Science of the Total Environment*, 815, 152507.
- Zhang, Y., Liang, J., Zeng, G., Tang, W., Lu, Y., Luo, Y., ... & Huang, W. (2020). How climate change and eutrophication interact with microplastic pollution and sediment resuspension in shallow lakes: A review. *Science of the Total Environment*, 705, 135979. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135979>
- Zhao, S., Zhang, Z., Chen, L., Cui, Q., Cui, Y., Song, D., & Fang, L. (2022). Review on migration, transformation and ecological impacts of microplastics in soil. *Applied Soil Ecology*, 176, 104486.
- Zhou, Q., Zhang, H., Zhou, Y., Li, Y., Xue, Y., Fu, C., Tu, C., & Luo, Y. (2016). Separation of microplastics from a coastal soil and their surface microscopic features. *Chinese Science Bulletin*, 61(16), 1604-1611. <https://doi.org/10.1360/n972015-01098>