Transport of microplastics induced by rainfall-driven water erosion in rangelands of semi-arid regions

Ahmad Samadi[1], **Kazem Nosrati**[2*], **Reza Dehband**[3]

[1] *PhD student, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran*

[2] *Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran*

[3] *Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran*

Research Full Paper

Article History (Received: 2026/04/18 Accepted: 2026/06/21)

Introduction

Agricultural and rangeland soils are increasingly recognized as major sinks of microplastics in terrestrial environments. Microplastics originate from both primary sources, such as industrial abrasives and personal care products, and secondary sources formed through fragmentation of larger plastic debris. Once introduced into soils, these particles can persist for long periods and interact with soil physical, chemical, and biological processes.

Among the various pathways controlling the fate of microplastics in soils, water erosion driven by rainfall events represents one of the most important mechanisms for their horizontal transport from terrestrial ecosystems to surface waters. Rainfall intensity, runoff generation, soil properties, slope, and vegetation cover are key factors influencing erosion processes and sediment transport. Vegetation cover, in particular, plays a crucial role by dissipating raindrop energy, increasing surface roughness, enhancing infiltration, and stabilizing soil aggregates. Degradation or removal of vegetation cover, common in semi-arid rangelands due to overgrazing and land-use change, can therefore substantially enhance soil erosion and pollutant export.

the role of microplastic particle size and vegetation cover in controlling selective transport and enrichment during erosion events is still poorly understood. Therefore, this study aimed to investigate the effect of rainfall-induced water erosion on the transport and enrichment ratio of microplastics in semi-arid rangeland erosion plots with contrasting vegetation cover. Particular attention was given to comparing the behavior of fine and coarse microplastic particles under natural rainfall events.

Materials and Methods

The study was conducted in rangelands located in the northern part of the Naharmian watershed in southwest Markazi Province, Iran, characterized by a semi-arid climate and heterogeneous vegetation cover. Two standard erosion plots (22 m long and 2 m wide) were established following USLE specifications. One plot was maintained under natural vegetation cover, while the other was kept bare to represent degraded rangeland conditions.

High-density polyethylene microplastics were used as tracer particles. Plastic granules were fragmented using a freeze-drying technique and separated into two size classes: 63–125 μm (fine microplastics) and 250–500 μm (coarse microplastics). These particles were uniformly distributed and mixed into the 0–10 cm soil layer of each plot. To prevent wind redistribution, the soil surface was gently compacted.

Soil samples were collected from the plot surface before the first rainfall and after each of three effective natural rainfall events that generated runoff. In total, 24 soil samples were collected. Sediment samples were also collected from the outlet of each plot after every rainfall event. In the laboratory, samples were air-dried, coarse materials were removed, and sequential sieving was performed. Organic matter was eliminated using hydrogen peroxide, and microplastics were identified and counted under a stereomicroscope.

Microplastic concentrations in soil and sediment were calculated, along with stepwise and cumulative depletion rates. The enrichment ratio (ER) was defined as the ratio of microplastic concentration in the exported sediment to that in the surface soil. Regression analyses were applied to examine relationships between sediment yield and microplastic enrichment.

* **Corresponding Author:** *k_nosrati@sbu.ac.ir*

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]

Results and Discussion

The results demonstrated that rainfall-induced water erosion caused a noticeable reduction in microplastic concentrations in the surface soil layer of both plots, with markedly different behaviors between size classes and vegetation treatments. Fine microplastics showed higher depletion rates than coarse particles in both plots, indicating greater mobility or redistribution during rainfall events. In the bare plot, cumulative depletion of fine microplastics was higher than in the vegetated plot, reflecting enhanced erosion and runoff generation under vegetation-free conditions. Coarse microplastics exhibited lower overall depletion, particularly during initial rainfall events, suggesting that higher shear stress was required for their mobilization.

Vegetation cover significantly moderated microplastic transport. The presence of vegetation reduced runoff energy and soil detachment, resulting in lower microplastic losses from the soil surface. Differences between the two size classes indicated that fine particles were more sensitive to repeated rainfall events, while coarse particles were mainly mobilized during more intense runoff conditions.

Analysis of enrichment ratios revealed contrasting trends between treatments. In vegetated plots, microplastic enrichment in exported sediment increased with successive rainfall events, whereas in bare plots enrichment decreased despite higher sediment production. This inverse relationship suggests a dilution effect in bare plots, where large amounts of mineral sediment reduced the relative contribution of microplastics. In contrast, selective erosion under vegetated conditions favored the transport of lighter and less dense microplastic particles relative to mineral soil particles.

Regression analyses confirmed a significant negative relationship between sediment yield and microplastic enrichment ratio, with high coefficients of determination. Fine microplastics showed weaker coupling between soil depletion and sediment enrichment, indicating that a portion of these particles may have migrated vertically into the soil profile rather than being exported laterally. This behavior highlights the dual role of erosion in both horizontal and vertical redistribution of microplastics.

Conclusion

This study provides clear field-based evidence that rainfall-driven water erosion is an effective mechanism for microplastic redistribution in semi-arid rangeland soils. Microplastic particle size was identified as a key controlling factor governing transport pathways and environmental fate. Coarse microplastics were more prone to horizontal transport with runoff and sediment, posing an immediate threat to downstream surface water bodies. In contrast, fine microplastics exhibited substantial depletion from the soil surface without a proportional increase in sediment concentrations, indicating enhanced vertical migration and a higher potential risk for long-term soil and groundwater contamination.

Vegetation cover played a critical role in regulating both soil erosion and microplastic export. By reducing runoff energy and promoting selective erosion, vegetation limited total sediment yield while increasing microplastic enrichment in transported sediment. These findings demonstrate that sediment load alone is not a sufficient predictor of microplastic transport risk; surface conditions and particle characteristics must also be considered.

From a management perspective, degraded rangelands can act as persistent sources of microplastics to aquatic ecosystems. Maintaining and restoring vegetation cover, alongside effective runoff management, can significantly reduce microplastic transfer from soils to surface waters. The results emphasize the importance of incorporating microplastic dynamics into soil erosion assessments and watershed management strategies, particularly in vulnerable semi-arid environments.

Keywords: Microplastics; Soil erosion; Runoff; Experimental plot; Vegetation cover

Cite this article: Samadi A., Nosrati K., & Dehbandi R. (2026). Transport of microplastics induced by rainfall driven water erosion in rangelands of semi-arid regions. *Journal of Environmental Erosion Research. 2026; 16 (2): 45-71.* http//doi.org/10.61882/jeer.16.2.7

© The Author(s).
DOI: http//doi.org/10.61882/jeer.16.2.7
Published by Hormozgan University Press.
URL: http://magazine.hormozgan.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]

انتقال میکروپلاستیک‌ها در اثر فرسایش آبی ناشی از بارندگی در اراضی مرتعی مناطق نیمه‌خشک

احمد صمدی: [۱] دانشجوی دکتری گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
کاظم نصرتی*: [۲] استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
رضا دهبندی: [۳] استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشر، ایران

نوع مقاله: پژوهشی
تاریخچهٔ مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۱)
DOI: http//doi.org/10.61882/jeer.16.2.7

چکیده

خاک‌های کشاورزی و مرتعی از بزرگ‌ترین مخازن تجمع میکروپلاستیک‌ها به شمار می‌روند، با این حال سازوکارهای انتقال این ذرات تحت فرسایش آبی هنوز به‌طور کامل شناخته نشده است. این پژوهش با هدف بررسی اثر فرسایش ناشی از بارندگی بر انتقال و نسبت غنی‌شدگی میکروپلاستیک‌ها در اراضی مرتعی شمال حوضه آبخیز نهرمیان در جنوب‌غرب استان مرکزی انجام شد. برای این منظور، دو کرت فرسایشی به ابعاد ۲×۲۲ متر با دو تیمار فاقد پوشش و دارای پوشش گیاهی احداث شد. میکروپلاستیک‌های پلی‌اتیلن در دو بازه اندازه‌ای ۱۲۵–۶۳ میکرومتر (ریز) و ۵۰۰–۲۵۰ میکرومتر (درشت) به‌طور یکنواخت در عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری خاک مخلوط گردید. نمونه‌برداری از سطح خاک پیش و پس از سه رخداد بارشی مؤثر انجام شد و در مجموع ۲۴ نمونه خاک و نمونه‌های رسوب خروجی کرت‌ها جمع‌آوری شد. پس از خشک سازی، جدا سازی ذرات درشت، غربال‌گری، شست‌وشو و حذف مواد آلی با پراکسید هیدروژن، نمونه‌ها برای شناسایی زیر میکروسکوپ استریو آماده شدند و تغییرات غلظت و نسبت غنی‌شدگی میکروپلاستیک‌ها تحلیل گردید. نتایج نشان داد اندازه ذره نقش اصلی را در سرنوشت میکروپلاستیک‌ها دارد. میکروپلاستیک‌های ریز بیشترین کاهش را در سطح خاک نشان دادند؛ به‌طوری‌که میانگین حذف آن‌ها در تیمار فاقد پوشش ۱۴ درصد و در تیمار دارای پوشش ۱۳ درصد از ذخیره اولیه بود. در مقابل، میکروپلاستیک‌های درشت در تیمار دارای پوشش ۵ درصد و در تیمار بدون پوشش ۴ درصد کاهش یافتند. همچنین نسبت غنی‌شدگی نشان داد که میکروپلاستیک‌های درشت بیشتر از میکروپلاستیک‌های ریز در رسوبات خروجی تجمع می‌یابند. این امر بیانگر تمایل بیشتر ذرات درشت به جابه‌جایی افقی و حمل توسط رواناب، و گرایش ذرات ریز به نفوذ عمودی و ماندگاری در خاک است. تحلیل رگرسیونی نشان داد با افزایش فرسایش و تولید رسوب، نسبت غنی‌شدگی به‌طور معناداری کاهش می‌یابد. این مطالعه تأکید می‌کند که ذرات درشت میکروپلاستیک با فرسایش‌پذیری بالا می‌توانند تهدیدی فوری برای کیفیت آب‌های سطحی باشند، در حالی که ذرات ریز با تجمع در خاک مرتعی، خطر آلودگی بلندمدت خاک و نفوذ به آب‌های زیرزمینی را به همراه دارند. همچنین پوشش گیاهی از طریق فرسایش انتخابی، الگوی خروج این ذرات را تنظیم می‌کند.

واژگان کلیدی: میکروپلاستیک؛ فرسایش خاک؛ رواناب؛ کرت آزمایشی؛ پوشش گیاهی

* **نویسندهٔ مسئول:** k_nosrati@sbu.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]

۱ـ مقدمه

پلاستیک‌ها به دلیل ویژگی‌هایی نظیر سبکی، دوام بالا، انعطاف‌پذیری و هزینه تولید پایین، به یکی از پرکاربردترین مواد در زندگی مدرن تبدیل شده‌اند؛ به‌گونه‌ای که تصور بسیاری از فعالیت‌های روزمره بدون آن‌ها دشوار است. بااین‌حال، افزایش سریع تولید جهانی پلاستیک که از حدود ۲ میلیون تن در دهه ۱۹۵۰ به بیش از ۳۹۰ میلیون تن در سال‌های اخیر رسیده است، موجب انباشت گسترده پسماندهای پلاستیکی در محیط‌زیست شده است (Geyer et al., 2017; PlasticsEurope, 2023). بخش قابل‌توجهی از این مواد پس از مصرف به‌درستی مدیریت نمی‌شوند و در محیط‌های طبیعی رها شده و در نهایت وارد اکوسیستم‌های آبی و خشکی می‌شوند. این پلاستیک‌ها در اثر فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی به ذرات ریزی موسوم به میکروپلاستیک‌ها (Microplastics) با اندازه کمتر از ۵ میلی‌متر و حتی نانوپلاستیک‌ها با اندازه کمتر از ۱ میکرومتر تجزیه می‌شوند (Barnes et al., 2009; Hahladakis et al., 2018).

میکروپلاستیک‌ها می‌توانند منشأ اولیه یا ثانویه داشته باشند. میکروپلاستیک‌های اولیه به‌طور مستقیم در اندازه‌های کوچک برای کاربردهای صنعتی و مصرفی تولید می‌شوند و در محصولاتی نظیر لوازم آرایشی، مواد ساینده صنعتی، رنگ‌ها و برخی تجهیزات پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرند، درحالی‌که میکروپلاستیک‌های ثانویه در اثر خردشدگی و تجزیه پلاستیک‌های بزرگ‌تر در محیط شکل می‌گیرند (Thompson et al., 2004; Cole et al., 2011). این ذرات از پلیمرهای مختلفی نظیر پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن، پلی‌استایرن و پلی‌وینیل‌کلراید تشکیل شده‌اند و در اشکال متنوعی مانند الیاف، فیلم‌ها، گرانول‌ها و قطعات نامنظم در محیط یافت می‌شوند (Kim, 2022; Khalid et al., 2020 & Esterhuizen). افزون بر این، وجود افزودنی‌های شیمیایی نظیر نرم‌کننده‌ها، پایدارکننده‌ها و رنگ‌دانه‌ها می‌تواند موجب افزایش سمیت بالقوه این ذرات شده و آن‌ها را به ناقل ترکیبات آلاینده و فلزات سنگین در محیط تبدیل کند (Aurisano et al., 2021; Turner & Filella, 2021).

در سال‌های اولیه پژوهش‌ها، تمرکز اصلی مطالعات بر حضور میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های دریایی و آبی بود؛ بااین‌حال، شواهد جدید نشان می‌دهد که خاک‌ها، به‌ویژه خاک‌های کشاورزی و مرتعی، می‌توانند به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین مخازن تجمع میکروپلاستیک‌ها در سطح کره زمین عمل کنند (Dixon, & Horton et al., 2017; Horton 2018; Rillig et al., 2021). برآوردها نشان می‌دهد که میزان ورود سالانه میکروپلاستیک‌ها به خاک‌های خشکی ممکن است چندین برابر ورود آن‌ها به اقیانوس‌ها باشد (Nizzetto et al., 2016). این ذرات از مسیرهای مختلفی وارد خاک می‌شوند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به استفاده از مالچ‌های پلاستیکی در کشاورزی، کاربرد کودهای آلی، کمپوست و لجن فاضلاب، فرسایش تایر خودروها، تجزیه زباله‌های پلاستیکی و رسوب جوی میکروپلاستیک‌ها اشاره کرد (An, 2018 & Amelung, 2018; Lv et al., 2019; Ren et al., 2021; Chae & Bläsing). در مناطق مرتعی نیز

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]

رسوب جوی ذرات پلاستیکی و انتقال آن‌ها از مناطق شهری و صنعتی مجاور می‌تواند منبع مهم آلودگی خاک باشد (Chaurasia et al., 2024).

پس از ورود میکروپلاستیک‌ها به خاک، این ذرات می‌توانند تحت تأثیر فرایندهای مختلف فیزیکی و زیستی جابه‌جا شوند. نفوذ آب، فعالیت موجودات خاکزی، ترک‌های انقباضی خاک و عملیات مدیریتی زمین از جمله عواملی هستند که می‌توانند موجب انتقال عمودی این ذرات در پروفیل خاک شوند (Rillig, 2012; de Souza Machado et al., 2018). بااین‌حال، انتقال افقی میکروپلاستیک‌ها از طریق فرسایش خاک و رواناب سطحی یکی از مهم‌ترین مسیرهای خروج آن‌ها از سامانه‌های خاکی و ورود به رودخانه‌ها و منابع آب سطحی محسوب می‌شود (Schüttrumpf, & Waldschläger 2019; Rehm et al., 2021; Dong et al., 2022). در این میان، شدت و انرژی بارندگی، شیب زمین، بافت خاک و به‌ویژه میزان پوشش گیاهی از عوامل کلیدی کنترل‌کننده تولید رواناب و انتقال رسوب و در نتیجه جابه‌جایی میکروپلاستیک‌ها هستند (Zhang et al., 2020; Yu et al., 2022).

پوشش گیاهی با کاهش سرعت رواناب، افزایش نفوذپذیری خاک و تثبیت ذرات خاک می‌تواند نقش مهمی در کنترل فرسایش و انتقال آلاینده‌های ذره‌ای ایفا کند. در مقابل، کاهش یا حذف پوشش گیاهی که اغلب در اثر چرای مفرط، تغییر کاربری اراضی و خشکسالی رخ می‌دهد، می‌تواند به افزایش فرسایش خاک و انتقال ذرات معلق از جمله میکروپلاستیک‌ها منجر شود (Li et al., 2019; Yang et al., 2023). نوع پوشش گیاهی و صفات کارکردی گونه‌ها تعیین‌کننده‌ی کارایی اکوسیستم در مهار فرسایش و کنترل انتقال ذرات است؛ زیرا گونه‌های مختلف از نظر عمق و معماری سامانه ریشه‌ای، تراکم ریشه در لایه‌های سطحی، تولید زی‌توده‌ی اندام هوایی، درصد و تداوم پوشش سطح خاک، و زبری هیدرولیکی سطح تفاوت‌های معنی‌داری دارند. برای نمونه، در مراتع نیمه‌خشک، گونه‌های بوته‌ای عمیق‌ریشه نظیر گون(Astragalus spp) با ایجاد شبکه ریشه‌ای پایدار و تقویت پیوستگی خاک، انسجام خاکدانه‌ها و مقاومت برشی خاک را افزایش داده و به تثبیت ذرات و کاهش جداشدگی خاک کمک می‌کنند. در مقابل، بسیاری از گندمیان و گونه‌هایی مانند گندم وحشی در قالب گونه‌های Triticumوحشی/مرتعی به‌واسطه‌ی ریشه‌های افشان متراکم در لایه‌ی سطحی و همچنین تولید تاج‌پوشش نسبتاً پیوسته، از طریق افزایش زبری سطح، تضعیف انرژی ضربه قطرات باران و افزایش فرصت نفوذ آب، در کاهش سرعت رواناب، افزایش نفوذپذیری لایه سطحی و کاهش تولید رسوب نقش برجسته‌تری دارند. شواهد پژوهشی نشان می‌دهد که افزایش پوشش گیاهی و زی‌توده‌ی هوایی عموماً با کاهش اتلاف خاک و رسوب‌دهی همراه است، در حالی‌که کاهش پوشش یا غالب شدن گونه‌های کم‌پوشش می‌تواند رواناب و انتقال رسوب را تشدید کند. از این رو، ترکیب گونه‌ای مراتع و غلبه گونه‌های دارای ریشه‌های مؤثر (عمیق یا متراکم سطحی) و اندام هوایی کافی برای پوشاندن سطح خاک، نه‌تنها برای کنترل فرسایش و رسوب، بلکه برای کاهش جابه‌جایی آلاینده‌های ذره‌چسب (از جمله میکروپلاستیک‌ها) نیز اهمیت اساسی دارد (Gyssels et al., 2005; De Baets et al.,

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]

2007; Zhou et al., 2008; Li et al., 2019; Yang et al., 2023). اراضی مرتعی به دلیل وسعت زیاد، حساسیت به تخریب پوشش گیاهی و نقش آن‌ها در تولید رواناب و رسوب، از جمله محیط‌هایی هستند که می‌توانند سهم قابل‌توجهی در انتقال این آلاینده‌های نوظهور داشته باشند. با وجود این اهمیت، بیشتر مطالعات انجام‌شده درباره انتقال میکروپلاستیک‌ها مبتنی بر پژوهش‌های آزمایشگاهی یا مدل‌سازی بوده و مطالعات میدانی که رفتار این ذرات را تحت رخدادهای واقعی بارش و فرایندهای طبیعی فرسایش بررسی کرده باشند، هنوز محدود است (O'Connor et al., 2019; Rehm et al., 2021; Yu et al., 2022). ازاین‌رو، شناخت رفتار انتقالی میکروپلاستیک‌ها در مقیاس میدانی و تحت شرایط واقعی بارندگی برای درک بهتر سرنوشت این آلاینده‌ها در اکوسیستم‌های خشکی ضروری است. بر همین اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی تأثیر فرسایش خاک ناشی از رخدادهای بارش طبیعی بر انتقال میکروپلاستیک‌ها در اراضی مرتعی با شرایط متفاوت پوشش گیاهی است. در این مطالعه، تغییرات غلظت میکروپلاستیک‌ها در خاک سطحی و رسوبات خروجی کرت‌های بدون پوشش و دارای پوشش گیاهی برای دو دامنه اندازه‌ای ریز (۱۲۵–۶۳ میکرومتر) و درشت (۵۰۰–۲۵۰ میکرومتر) بررسی شد. همچنین با استفاده از شاخص نسبت غنی‌شدگی (Enrichment Ratio, ER)، رفتار انتخابی میکروپلاستیک‌ها در فرایند فرسایش آبی و ارتباط آن با تولید رسوب ارزیابی گردید.

۲ـ منطقه مورد مطالعه

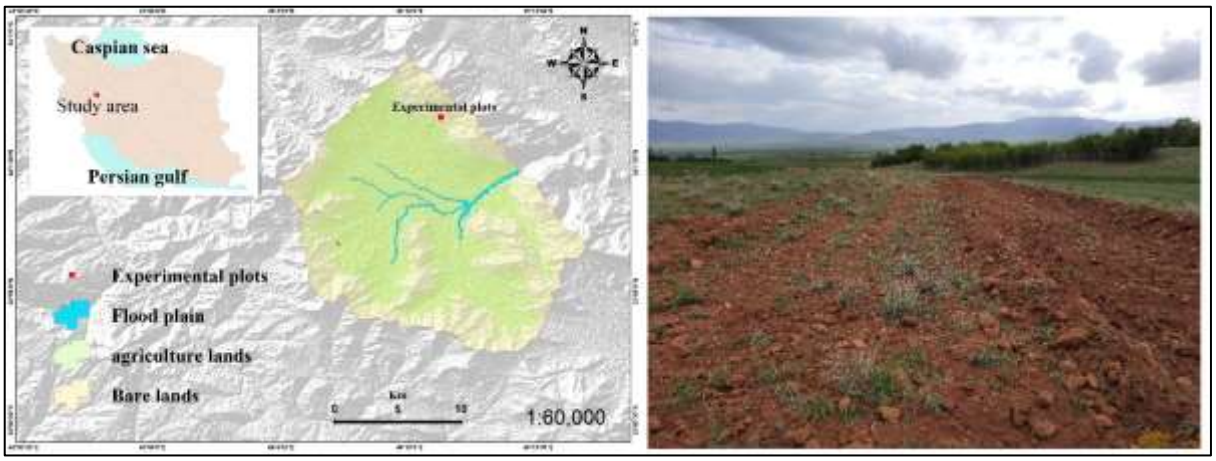
این پژوهش در بخشی از اراضی مرتعی واقع در شمال حوضه آبریز نهرمیان، در جنوب غرب استان مرکزی، ایران انجام شد. کرت آزمایش در محدوده جغرافیایی تقریبی ۳۴ درجه و ۲/۲۶ دقیقه و ۵۶ ثانیه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۱۰/۵۶ دقیقه و ۴۸ ثانیه طول شرقی قرار دارد. این منطقه از نظر اقلیمی در زمره مناطق نیمه‌خشک فلات مرکزی ایران طبقه‌بندی می‌شود. وسعت کل این حوضه حدود ۲۷۶ کیلومترمربع است که بخش قابل‌توجهی از آن را اراضی مرتعی و غیرکشاورزی تشکیل می‌دهد (شکل ۱).

از نظر زمین شناسی، سازندهای غالب منطقه شامل واحدهای آهکی کرتاسه، کنگلومرا و سنگ‌های دگرگونی نظیر فیلیت و اسلیت است. این تنوع زمین‌شناسی همراه با شیب‌های نسبتاً تند دامنه‌ها، شرایط مساعدی برای تولید رواناب و فرسایش آبی فراهم کرده است. لندفرم‌های شاخص منطقه شامل دامنه‌های کوهستانی، آبرفت‌های رودخانه‌ای، تراس‌ها و گالی‌ها است که همگی در تولید و انتقال رسوب نقش دارند.

اقلیم منطقه نیمه‌خشک بوده و میانگین بارندگی سالانه حدود ۴۷۰ میلی‌متر است که بخش عمده آن در فصول پاییز و زمستان رخ می‌دهد. بارش‌ها غالباً به صورت رخدادهای ناپیوسته با شدت‌های متفاوت اتفاق می‌افتند و می‌توانند رواناب سطحی قابل‌توجهی در اراضی مرتعی ایجاد کنند. دمای سالانه و تبخیر نسبتاً بالا، به‌ویژه در فصل گرم، موجب حساسیت بیشتر خاک‌ها به فرسایش در صورت کاهش پوشش گیاهی می شود. پوشش گیاهی مراتع منطقه ناهمگن است و تحت‌تأثیر عواملی نظیر چرای دام، شرایط اقلیمی و فعالیت‌های انسانی، از تراکم نسبتاً مناسب تا نواحی کاملاً فاقد پوشش متغیر است. این ناهمگنی، فرصت مناسبی برای مقایسه نقش‌پوشش گیاهی در کنترل فرسایش و انتقال میکروپلاستیک فراهم می‌کند.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و محل استقرار کرت‌های فرسایشی

۳ـ مواد و روش‌ها

۳- ۱ طرح کرت‌های فرسایشی آزمایشی و روش نمونه‌برداری

کرت‌های آزمایشی این پژوهش در بخشی از این اراضی مرتعی انتخاب و احداث شدند، به‌گونه‌ای که شرایط واقعی مرتع منطقه از نظر شیب، خاک و پوشش گیاهی را بازتاب دهند. این انتخاب به‌منظور بررسی دقیق‌تر رفتار میکروپلاستیک در مقیاس کرت و تحت رخدادهای طبیعی بارش انجام گرفت و امکان مقایسه مستقیم کرت‌های بدون پوشش و دارای پوشش گیاهی را فراهم ساخت. دو کرت آزمایشی هم‌اندازه (طول ۲۲ متر و عرض ۲ متر) مطابق با ابعاد استاندارد معادله جهانی تلفات خاک (USLE) احداث شد. یکی از کرت‌ها بدون پوشش گیاهی و دیگری با حفظ پوشش گیاهی طبیعی مرتع (گون، و گندم گونه ها) در نظر گرفته شد. ویژگی های خاک در سطح کرت های آزمایش در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱- ویژگی های خاک در سطح کرت های آزمایش

کرت فرسایشی	هدایت الکتریکی ($mhos\ cm^{-1}$)	pH	پتاسم ($g\ kg^{-1}$)	سدیم ($g\ kg^{-1}$)	کربن آلی ($g\ kg^{-1}$)	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)
فاقد پوشش گیاهی	۹۳۰	۷/۸	۱۳/۲	۲۹/۵	۱۲/۳	۳۶	۵۴	۱۰
دارای پوشش گیاهی	۹۹۰	۸/۲	۷/۱	۲۲/۱	۱۴/۲	۳۴	۵۲	۱۴

دانه‌های پلیمر به روش فریزدرایر به میکروپلاستیک‌های کوچکتر از ۵۰۰ میکرومتر خرد شدند. میکروپلاستیک پلی‌اتیلن با چگالی بالا برای دو دامنه اندازه‌ای ریز (۱۲۵–۶۳ میکرومتر) به مقدار ۴۵۰ گرم و و درشت (۵۰۰–۲۵۰ میکرومتر) به مقدار ۹۰۰ گرم، به‌طور یکنواخت در سطح کرت‌ها پخش و در عمق صفر تا ۱۰سانتی‌متری خاک مخلوط شدند. سطح کرت‌ها با یک وزنه استوانه‌ای ۳۰ کیلوگرمی به ابعاد ۱ متر در ۲۰ سانتیمتر فشرده شد تا در اثر فرسایش بادی و عوامل

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]

محیطی دیگر، میکروپلاستیک‌ها از سطح کرت خارج و پراکنده نشوند. نمونه‌برداری با استفاده از رینگ های نمونه بردار به روش سیستمی تصادفی از ۹ نقطه هر کرت برداشت شد. ۳ نقطه در انتهای کرت، ۳ نقطه در میانه کرت و ۳ نقطه در بالای کرت. هدف از توزیع نقاط نمونه برداری در سه قسمت پایین، میانه و بالای کرت ها، مقایسه نحوه حرکت میکروپلاستیک ها در طول کرت و توزیع اثر فرسایش در کل سطح کرت بود. همچنین رسوب تجمع‌یافته در انتهای کرت‌ها پس از هر بارش جمع‌آوری گردید. در مجموع، ۳ بارش (به ترتیب ۲۵ میلیمتر در آبان ۱۴۰۰، ۱۹ میلیمتر در اسفند ۱۴۰۰ و ۴۱ میلیمتر در فروردین ۱۴۰۱) که در سطح کرت‌ها منجر به جاری شدن رواناب شدند، ثبت شد. با توجه به اینکه سه رخداد بارش منجر به رواناب در طی دوره آزمایش وجود داشت، در مجموع ۶ نمونه آب و رسوب از مخزن انتهای هر دو کرت و ۲۴ نمونه (۶ نمونه قبل شروع بارش و بعد از اضافه کردن میکروپلاستیک ها، ۶ نمونه بعد از بارش اول، ۶ نمونه بعد از بارش دوم و ۶ نمونه بعد از بارش سوم) خاک از سطح کرت ها برداشت شد. غلظت رسوب بر حسب گرم بر لیتر در نمونه های خروجی از کرت‌های فرسایشی بعد از هر بارندگی اندازه‌گیری شد و بر حسب مقدار رواناب کل خروجی از کرت میزان کل رسوب خروجی از کرت بر حسب گرم تعیین شد.

۳-۲- استخراج و تعیین مقدار میکروپلاستیک‌ها از نمونه‌های خاک و رسوب

پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، خاک و رسوبات مرطوب که در کیسه‌ها یا ظروف آلومینیومی و شیشه ای نگهداری شده بودند، به یک صفحه آلومینیومی تمیز منتقل شده و به مدت ۴۸ تا ۷۲ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شدند و به وزن ثابت رسیدند. در طول فرایند خشک‌سازی، نمونه‌ها با فویل‌های آلومینیومی پوشانده شدند تا از آلودگی احتمالی میکروپلاستیک از طریق هوا جلوگیری شود. پس از خشک شدن نمونه‌ها، ذرات بزرگ شامل سنگ‌ها، چوب، ماسه و زباله‌های پلاستیکی بزرگ جدا شدند. با توجه به اینکه در این مطالعه، میکروپلاستیک در دو دامنه اندازه‌ای ریز (۱۲۵–۶۳ میکرومتر) و درشت (۵۰۰–۲۵۰ میکرومتر) مورد بررسی قرار گرفتند، الک‌هایی متناسب با این اندازه‌ها برای جدا کردن این ذرات استفاده شد. ۲۰ گرم از هر نمونه خاک انتخاب شد. در مرحله بعد، با استفاده از الک‌های ۵۰۰، ۲۵۰، ۱۲۵ و ۶۳ میکرومتر، نمونه‌های خاک ۲۰ بار با آب مقطر در یک ظرف استیل ضدزنگ شسته شدند و ذرات خاک به طور کامل جدا شدند. پس از خشک شدن نمونه‌های جدا شده، آنها به یک بشر ۲۰ میلی‌لیتری منتقل شدند تا مواد آلی با استفاده از پراکسید هیدروژن ۳۵ درصد به مدت ۲۴ ساعت از بین بروند. سپس نمونه‌ها به مدت زمان مورد نیاز در آون خشک شدند. رسوبات خشک‌شده به صفحات پتری دیش منتقل و میکروپلاستیک به وسیله میکروسکوپ نوری استریو با دقت مشاهده و شمارش شدند.

۳-۳- پردازش و تحلیل داده‌ها

پس از پردازش داده‌های رسوب و رواناب خروجی از کرت‌ها، با استفاده از نرم افزارهای Excel و Origin نمودار روند تغییرات رسوب و رواناب طی سه رخداد بارش رسم شد. درصد کاهش مرحله‌ای و تجمعی میکروپلاستیک خاک و

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]

همچنین نسبت میکروپلاستیک موجود در رسوب به مقدار اولیه خاک با استفاده از شاخص ER (Rehm et al., 2021) محاسبه شد.

$$ER = \frac{\text{تعداد میکروپلاستیک ها در رسوب انتهای کرت}}{\text{تعداد میکروپلاستیک ها در خاک سطح کرت}}$$

نسبت غنی‌شدگی میکروپلاستیک (ER) به‌صورت نسبت غلظت میکروپلاستیک در رسوب به غلظت آن در خاک سطحی تعریف گردید. ارتباط بین نسبت غنی‌شدگی و رسوب خروجی از کرتها از روابط رگرسیونی استفاده شد.

۴-یافته‌ها

۴-۱- رفتار رواناب و رسوب در کرت‌های فرسایشی

با توجه به نمودار ارائه‌شده برای کرت فاقد پوشش گیاهی (شکل ۲-الف)، هر دو متغیر حجم رواناب و غلظت رسوب در سه رخداد بارندگی روند افزایشی نشان می‌دهند. حجم رواناب تقریباً از حدود ۵/۳ لیتر در رخداد اول به حدود ۸/۲ لیتر در رخداد سوم افزایش یافته است. به‌طور هم‌زمان، غلظت رسوب نیز از حدود ۶/۲ گرم بر لیتر به حدود ۹/۵ گرم بر لیتر رسیده است. این الگوی افزایشی نشان می‌دهد که با تکرار رخدادهای بارندگی، کارایی تولید رواناب و همچنین ظرفیت انتقال رسوب در کرت فاقد پوشش گیاهی افزایش یافته است.

بر اساس Morgan (۲۰۰۵) و Toy et al. (۲۰۰۲)، وقوع بارندگی‌های متوالی می‌تواند باعث کاهش تدریجی ظرفیت نفوذ خاک شود. با توجه به رسی – سیلتی بودن خاک در سطح دو کرت (جدول ۱)، کاهش نفوذ باران در بارشهای بعدی بیشتر خواهد بود. در رخداد اول، بخشی از آب باران در خاک نفوذ کرده و رواناب نسبتاً محدودتری تولید می‌شود؛ اما در رخدادهای بعدی، به دلیل انسداد منافذ خاک توسط ذرات ریز (رس و سیلت)، تشکیل سله سطحی و افزایش رطوبت اولیه خاک، ظرفیت نفوذ کاهش یافته و سهم بیشتری از بارندگی به رواناب تبدیل می‌شود. در نتیجه حجم رواناب در رخدادهای دوم و سوم افزایش می‌یابد. در کرت‌های فاقد پوشش گیاهی این فرایند شدیدتر است، زیرا سطح خاک در معرض مستقیم انرژی قطرات باران قرار دارد و تخریب ساختمان خاک با توجه به رسی بودن خاک سریع‌تر رخ می‌دهد. افزایش هم‌زمان غلظت رسوب بر اساس Smith & Wischmeier (۱۹۷۸) و همچنین Morgan (۲۰۰۵)، نتیجه دو فرایند اصلی است: ۱) جداشدگی ذرات خاک توسط انرژی ضربه‌ای قطرات باران و ۲) انتقال این ذرات توسط جریان رواناب است. در کرت فاقد پوشش گیاهی، نبود مانع فیزیکی مانند ساقه‌ها و بقایای گیاهی موجب می‌شود که انرژی جنبشی قطرات باران به طور مستقیم به سطح خاک منتقل شود و جداشدگی ذرات خاک افزایش یابد. با افزایش حجم و سرعت رواناب در رخدادهای بعدی، ظرفیت حمل جریان نیز بیشتر شده و ذرات جداشده با کارایی بیشتری منتقل می‌شوند؛ در نتیجه غلظت رسوب در رواناب افزایش می‌یابد. در واقع، هم‌زمانی افزایش حجم رواناب و غلظت رسوب نشان‌دهنده افزایش کارایی سیستم فرسایش-انتقال رسوب در این کرت است.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

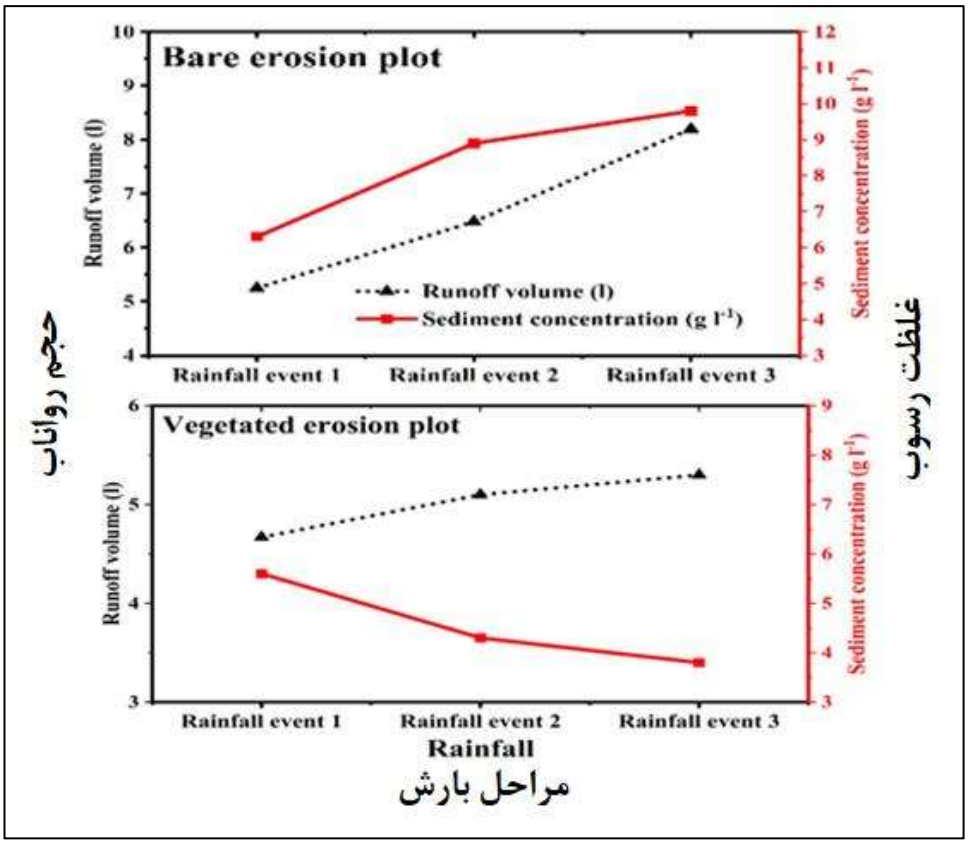
[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]

این الگو بیانگر آن است که در نبود پوشش گیاهی، سامانه سطح خاک به‌سرعت وارد مرحله‌ای می‌شود که در آن تولید رواناب و فرسایش به‌طور هم‌زمان تشدید می‌شوند. در چنین شرایطی، تمرکز جریان و فرآیند فرسایش شیاری نیز می‌تواند به افزایش انتقال رسوب کمک کند. همان‌طور که Nearing et al. (۱۹۹۹) و Kinnell (۲۰۰۵) اشاره کرده‌اند، افزایش انرژی جریان در شیب‌های بدون پوشش گیاهی می‌تواند باعث تشدید انتقال رسوب و افزایش غلظت آن در رواناب شود. نتایج به‌دست‌آمده با بسیاری از مطالعات تجربی در زمینه فرسایش آبی همخوانی دارد. به عنوان مثال، Zhang et al. (۲۰۱۰) و Li et al. (۲۰۱۴) نشان دادند که در کرت‌های فاقد پوشش گیاهی، هم حجم رواناب و هم غلظت رسوب در رخدادهای بارندگی متوالی افزایش می‌یابد، زیرا تخریب تدریجی ساختمان خاک و تشکیل سله سطحی موجب کاهش نفوذپذیری و افزایش رواناب می‌شود. همچنین Nearing (۲۰۰۱) نشان داد که حذف پوشش گیاهی می‌تواند چندین برابر باعث افزایش تولید رسوب شود، زیرا پوشش گیاهی به‌طور هم‌زمان انرژی قطرات باران را مستهلک کرده، سرعت رواناب را کاهش می‌دهد و پایداری خاکدانه‌ها را افزایش می‌دهد.

این نتایج اهمیت حیاتی حفظ پوشش گیاهی در اراضی مرتعی مناطق نیمه‌خشک را نشان می‌دهد. در این مناطق، کاهش پوشش گیاهی در اثر عواملی مانند چرای مفرط یا خشکسالی می‌تواند منجر به افزایش سریع تولید رواناب و رسوب شود. افزایش تولید رسوب نه‌تنها موجب کاهش حاصلخیزی خاک و تخریب ساختار خاک سطحی می‌شود، بلکه انتقال مواد آلاینده مانند میکروپلاستیک‌ها را نیز تسهیل می‌کند. بنابراین مدیریت مناسب چرا، احیای پوشش گیاهی و استفاده از روش‌های حفاظت خاک مانند کاهش شدت چرا، بذرپاشی گونه‌های مرتعی و تثبیت سطح خاک می‌تواند نقش مهمی در کاهش فرسایش و انتقال آلاینده‌ها داشته باشد.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]



شکل ۲- ارتباط بین حجم رواناب و غلظت رسوب در دو کرت فرسایشی: فاقد پوشش گیاهی و دارای پوشش گیاهی.

نتایج حاصل از کرت دارای پوشش گیاهی (شکل ۲-ب) نشان می‌دهد که حجم رواناب در سه رخداد بارندگی روند افزایشی ملایمی داشته و از حدود ۴/۷ لیتر در بارندگی اول به حدود ۵/۳ لیتر در بارندگی سوم رسیده است، در حالی‌که غلظت رسوب روندی کاهشی را طی کرده و از حدود ۵/۳ گرم بر لیتر در رخداد اول به حدود ۳/۸ گرم بر لیتر در رخداد سوم کاهش یافته است. این الگوی رفتاری نشان‌دهنده نقش مؤثر پوشش گیاهی در کنترل فرایندهای هیدرولوژیکی و فرسایشی سطح خاک است (Toy et al., 2002 ؛Morgan, 2005 ؛Smith, 1978 & Wischmeier). افزایش اندک حجم رواناب را می‌توان ناشی از افزایش تدریجی رطوبت اولیه خاک در رخدادهای بارشی متوالی دانست که موجب کاهش نسبی ظرفیت مکش خاک و در نتیجه افزایش محدود رواناب می‌شود. با این حال، حضور پوشش گیاهی از طریق برگاب، افزایش نفوذپذیری خاک به واسطه فعالیت ریشه‌ها و ایجاد ماکروپورها، و همچنین افزایش زبری سطحی، موجب کاهش سرعت جریان سطحی و افزایش زمان نگهداشت آب بر سطح خاک شده و از افزایش شدید رواناب جلوگیری کرده است.

در مقابل، کاهش غلظت رسوب در رخدادهای متوالی نشان‌دهنده اثر حفاظتی پوشش گیاهی در کاهش فرسایش خاک است. پوشش گیاهی با کاهش انرژی جنبشی قطرات باران، از برخورد مستقیم قطرات با سطح خاک جلوگیری کرده و در نتیجه فرایند جداشدگی ذرات خاک را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. علاوه بر این، ساقه‌ها و بقایای گیاهی

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]

موجود در سطح خاک به عنوان موانع فیزیکی عمل کرده و با کاهش سرعت جریان و ایجاد شرایط رسوب‌گذاری، بخشی از ذرات حمل شده را در طول مسیر جریان به دام می‌اندازند. در چنین شرایطی، حتی با افزایش نسبی حجم رواناب، به دلیل محدود شدن فرایند جداشدگی و کاهش منبع تولید رسوب، غلظت رسوب در جریان خروجی کاهش می‌یابد. به دلیل تثبیت سطح خاک توسط پوشش گیاهی، مقدار ذرات قابل جداشدگی کاهش یافته و در نتیجه توان تولید رسوب محدود می‌شود. این در حالی است که در سطوح فاقد پوشش گیاهی، افزایش رواناب مستقیماً منجر به افزایش انتقال رسوب می‌شود.

نتایج به‌دست‌آمده با یافته‌های Pan و Shangguan (۲۰۰۶) انطباق دارد که گزارش کردند حضور پوشش گیاهی در اراضی شیب‌دار می‌تواند غلظت رسوب را به طور چشمگیری کاهش دهد، حتی اگر کاهش رواناب چندان قابل توجه نباشد. همچنین Zhang et al. (۲۰۱۰) و Li et al. (۲۰۱۴) نشان دادند که پوشش گیاهی با کاهش انرژی مؤثر بارندگی و تثبیت ساختار خاک، نقش مهمی در کاهش جداشدگی و انتقال ذرات خاک ایفا می‌کند. بنابراین نتایج این مطالعه نیز نشان می‌دهد که پوشش گیاهی مرتعی به عنوان یک عامل کلیدی در افزایش پایداری هیدرولوژیکی خاک عمل کرده و با کاهش غلظت رسوب در رواناب، می‌تواند نقش مهمی در کنترل فرسایش و جلوگیری از انتقال مواد آلاینده همراه رسوب، از جمله میکروپلاستیک‌ها، ایفا کند. از دیدگاه مدیریتی، این یافته‌ها بر اهمیت حفظ و تقویت پوشش گیاهی در مراتع مناطق نیمه‌خشک تأکید دارد، زیرا حتی پوشش‌های گیاهی نسبتاً محدود نیز می‌توانند با کاهش فرسایش و رسوب‌دهی، به عنوان یک راهکار طبیعی و کم‌هزینه در مدیریت حوزه‌های آبخیز و کاهش انتقال آلاینده‌ها به منابع آب پایین‌دست عمل کنند.

۴-۲ الگوی هدررفت و جابجایی میکروپلاستیک در کرت آزمایشی

نتایج اندازه‌گیری غلظت میکروپلاستیک‌ها در دو بازه اندازه ۶۳ تا ۱۲۵ و ۲۵۰ تا ۵۰۰ میکرومتر نشان داد که با وقوع رخدادهای متوالی بارندگی طبیعی، غلظت این ذرات در لایه سطحی خاک (۰ تا ۱۰ سانتی‌متر) به طور قابل توجهی کاهش یافته و این کاهش با شدت فرسایش آبی و شرایط سطحی پلات‌ها ارتباط مستقیم دارد. در بازه ریز (۶۳ تا ۱۲۵ میکرومتر)، میانگین درصد کاهش میکروپلاستیک‌ها در پلات فاقد پوشش گیاهی پس از سه رخداد بارندگی به ترتیب حدود ۵/۸، ۱۴، ۲۱/۸ درصد بود، در حالی که در پلات دارای پوشش گیاهی مقادیر متناظر حدود ۹/۶، ۹/۴، و ۲۱/۶ درصد گزارش شد. در بازه درشت (۲۵۰ تا ۵۰۰ میکرومتر)، میانگین درصد کاهش در پلات فاقد پوشش گیاهی پس از سه بارندگی به ترتیب حدود ۶/۶، ۴ و ۲۷ درصد و در تیمار دارای پوشش گیاهی حدود ۴/۳، ۳/۹ و ۲۱/۶ درصد بود (جدول ۲). رفتار دو بازه اندازه به روشنی نشان می‌دهد که اندازه ذرات بر میزان و الگوی انتقال آن‌ها مؤثر است و ذرات ریز، طی رخدادهایی متوالی، به‌تدریج با رواناب منتقل می‌شوند، در حالی که ذرات درشت در بارش‌های اولیه کمتر جابه‌جا شده و عمدتاً در رخدادهای شدیدتر و با افزایش حجم رواناب، دچار انتقال قابل‌ملاحظه می‌شوند (شکل ۳).

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]

در پلات فاقد پوشش گیاهی، روند افزایشی و نسبتاً خطی کاهش در هر دو بازه اندازه نشان‌دهنده حاکمیت شرایط حمل‌محدود است؛ یعنی با تشدید رواناب سطحی، ظرفیت جریان برای انتقال مواد سبک و ریز مانند میکروپلاستیک‌ها افزایش یافته و طی سه رخداد متوالی، اثر تجمعی فرسایش سبب خارج شدن بخش قابل توجهی از ذرات از لایه سطحی خاک می‌شود. چنین روندی بیانگر تخریب پیشرونده ساختار خاک در اثر انرژی مستقیم ضربات قطرات باران و تشکیل سله سطحی است که موجب کاهش شدید نفوذپذیری و افزایش رواناب می‌شود. این رفتار با مدل‌های کلاسیک فرسایش آبی همخوانی کامل دارد (Wischmeier & Smith, 1978; Morgan, 2005) و همچنین با یافته‌های جدید در خصوص مکانیزم‌های انتقال میکروپلاستیک‌ها از خاک به سیستم‌های آبی مطابقت دارد. برای نمونه، Hurley و Nizzetto (۲۰۱۸) گزارش کردند که میکروپلاستیک‌ها در خاک‌های فاقد پوشش گیاهی و تحت رخدادهای بارندگی شدید، می‌توانند تا چندین درصد از محتوی خود را تنها در چند رخداد از دست دهند. Zhang et al. (۲۰۲۰) نیز به طور تجربی نشان دادند که فقدان پوشش گیاهی بر شدت انتقال پلیمرهای سبک تأثیر مستقیم دارد و نرخ خروج آن‌ها به همراه رسوب تا چهار برابر افزایش می‌یابد.

در مقابل، در پلات دارای پوشش گیاهی، هر دو بازه اندازه کاهش تدریجی اما محدودتری را نشان دادند، به‌طوری که در دو بارش اول، تغییرات درصد کاهش میکروپلاستیک‌ها ناچیز و تقریباً ثابت بود، و تنها در بارش سوم و با افزایش شدید بارش و رواناب، کاهش قابل توجهی مشاهده شد. این رفتار تأییدکننده نقش فیزیکی و هیدرولوژیکی پوشش گیاهی در کاهش فرسایش و انتقال ذرات است. حضور پوشش گیاهی از طریق جذب انرژی باران توسط برگ‌ها و ساقه‌ها، افزایش نفوذپذیری خاک توسط ریشه‌ها، و افزایش زبری سطح از طریق بقایای آلی، موجب کاهش جداشدگی میکروپلاستیک‌ها و انتقال آن‌ها می‌شود. در واقع، سیستم در این شرایط در حالت منبع‌محدود عمل می‌کند؛ به این معنا که توانایی جریان در انتقال وجود دارد، اما مقدار ذرات قابل جداشدگی محدود است. پژوهش‌های متعدد این نقش حفاظتی پوشش گیاهی را تأیید کرده‌اند؛ به‌طوری که Gyssels et al. (۲۰۰۵) و Pan & Shangguan (۲۰۰۶) نشان دادند پوشش گیاهی می‌تواند انرژی ضربه باران و نرخ فرسایش اولیه را تا ۷۰ درصد کاهش دهد. همچنین مطالعات جدیدتر بر رفتار میکروپلاستیک‌ها (Chae & An, 2020; Rillig et al., 2021) بیان می‌کنند که وجود پوشش گیاهی موجب گیر افتادن ذرات پلاستیکی در سطح و اطراف ریشه‌ها شده و مانع انتقال آن‌ها همراه رسوب می‌شود.

جدول ۲- تغییرات میکروپلاستیک ها در عمق صفر تا ۱۰ سانتیمتری سطح کرت دارای پوشش و فاقد پوشش گیاهی، قبل از شروع بارش و بعد از بارش های اول تا سوم.

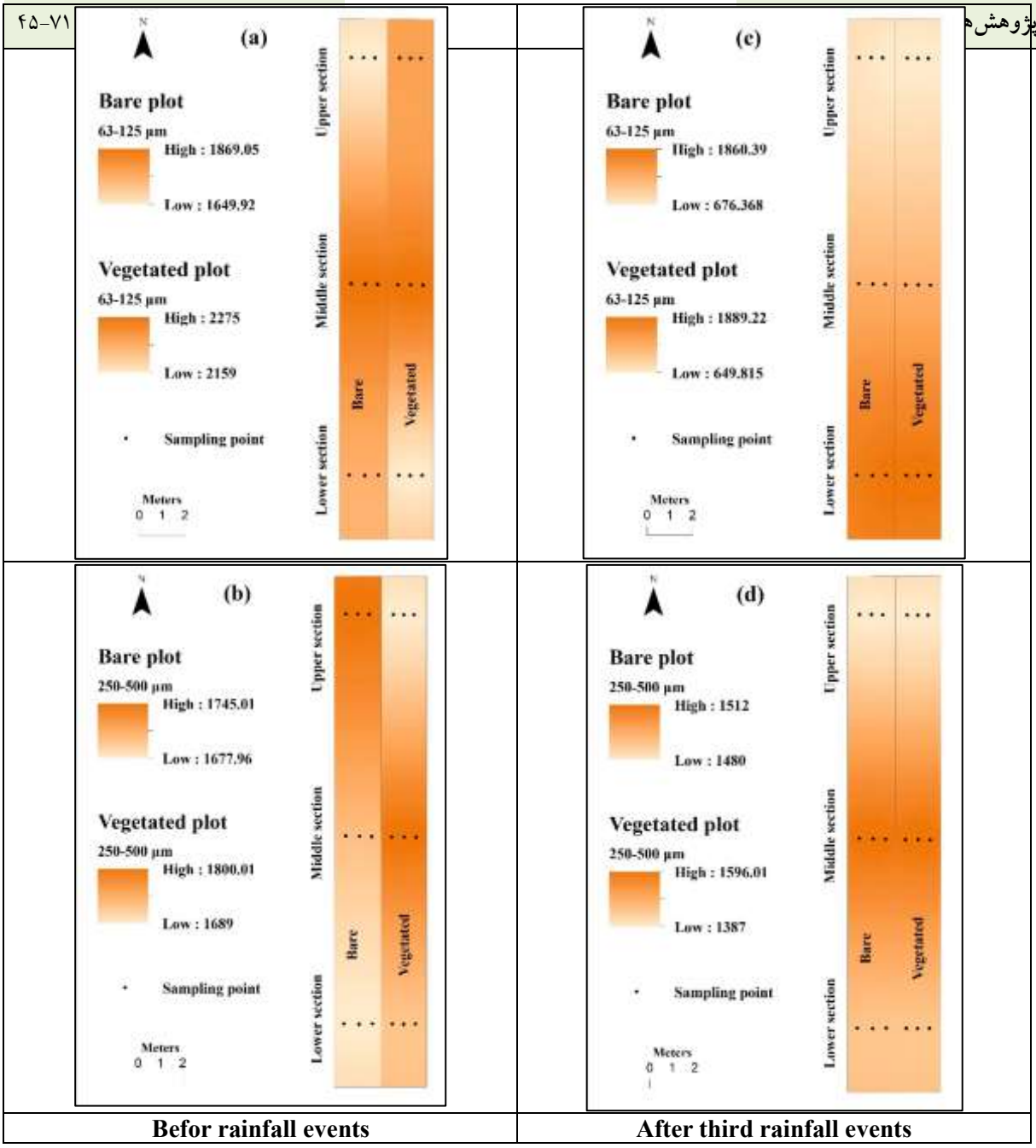
[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]

اندازه میکروپلاستیک(میکرومتر)	نوع پلات	مراحل بارش	تعداد میکروپلاستیک ها درسطح کرت (تعداد/ کیلوگرم)	درصد کاهش میکروپلاستیک ها از سطح کرت
63-125	فاقد پوشش گیاهی	قبل از شروع بارش	35160	
63-125	فاقد پوشش گیاهی	بعد از بارش اول	33106	5.8
63-125	فاقد پوشش گیاهی	بعد از بارش دوم	28333	14
63-125	فاقد پوشش گیاهی	بعد از بارش سوم	21966	21.8
63-125	دارای پوشش گیاهی	قبل از شروع بارش	37760	
63-125	دارای پوشش گیاهی	بعد از بارش اول	34586	9.6
63-125	دارای پوشش گیاهی	بعد از بارش دوم	31226	9.4
63-125	دارای پوشش گیاهی	بعد از بارش سوم	25173	21.6
250-500	فاقد پوشش گیاهی	قبل از شروع بارش	34166	
250-500	فاقد پوشش گیاهی	بعد از بارش اول	31693	6.6
250-500	فاقد پوشش گیاهی	بعد از بارش دوم	31153	4
250-500	فاقد پوشش گیاهی	بعد از بارش سوم	29880	27
250-500	دارای پوشش گیاهی	قبل از شروع بارش	34746	
250-500	دارای پوشش گیاهی	بعد از بارش اول	33253	4.3
250-500	دارای پوشش گیاهی	بعد از بارش دوم	31940	3.9
250-500	دارای پوشش گیاهی	بعد از بارش سوم	29553	21.6

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]



شکل ۳- توزیع و جابجایی میکروپلاستیک با دو بازه اندازه ۱۲۵–۶۳ (a و c)و ۵۰۰–۲۵۰ (b و d)میکرومتر در سطح کرت فرسایشی دارای پوشش و فاقد پوشش قبل از بارندگی اول (a و b)و بعد از بارندگی سوم(c و d).

مقایسه دو بازه اندازه نشان می‌دهد که ذرات درشت (۲۵۰ تا ۵۰۰ میکرومتر) نسبت به ذرات ریز (۶۳ تا ۱۲۵ میکرومتر) در رخدادهای بارندگی کمتر دچار هدررفت می‌شوند. این موضوع نشان می‌دهد که در شرایط رواناب شدید، نیروی برشی سطحی قادر است حتی ذرات درشت را جابه‌جا کند. در پلات دارای پوشش گیاهی نیز، نسبت کاهش ذرات درشت در بارش سوم به منطق مشابهی مرتبط است: با اشباع خاک و افزایش جریان، بخشی از ذرات حبس‌شده در میان بقایای گیاهی آزاد شده و حمل می‌شوند. به طور کلی، در هر دو اندازه ذره، رخداد سوم بارندگی نقش تعیین‌کننده در تسریع انتقال میکروپلاستیک‌ها داشته است.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]

Chaurasia et al. (۲۰۲۴) گزارش کردند که اندازه ذرات عامل تعیین‌کننده در قابلیت حمل میکروپلاستیک‌ها در جریان سطحی است؛ به‌طوری که ذرات ریز سریع‌تر از سطح خاک جدا می‌شوند، اما ذرات درشت برای جابه‌جایی نیازمند انرژی برشی و رواناب بیشتر هستند. همچنین Yu et al. (۲۰۲۲) اشاره کردند که افزایش شدت بارندگی موجب افزایش نسبت ذرات درشت در رواناب می‌شود زیرا مقاومت اتصال سطحی آن‌ها در اثر خیس شدن خاک کاهش می‌یابد. در مجموع، داده‌های این پژوهش تأیید می‌کند که پوشش سطحی خاک و اندازه ذرات از شاخص‌های کلیدی برای پیش‌بینی رفتار انتقال میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های طبیعی هستند.

بر اساس نتایج ترکیبی دو بازه اندازه، می‌توان نتیجه گرفت که وقوع سه رخداد بارندگی طبیعی منجر به کاهش میانگین غلظت میکروپلاستیک‌ها در خاک تا حدود ۲۰ تا ۲۷ درصد در پلات فاقد پوشش گیاهی و حدود ۲۱ درصد در پلات دارای پوشش گیاهی شده است. این یافته‌ها به‌وضوح نشان می‌دهد که فرسایش آبی ناشی از بارندگی‌های طبیعی حتی در شدت‌های متوسط، قابلیت جابه‌جایی قابل‌توجهی برای میکروپلاستیک‌ها دارد، اما حضور پوشش گیاهی این فرایند را تا حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد کاهش داده است. به عبارت دیگر حفظ پوشش گیاهی نه‌تنها در کاهش فرسایش و تولید رسوب مؤثر است، بلکه می‌تواند به عنوان مانع طبیعی برای جلوگیری از انتقال آلاینده‌های نوظهور مانند میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های مرتعی عمل کند. این نتیجه با جهت‌گیری پژوهش‌های اخیر در حوزه چرخه خاک–رواناب (Rillig et al., 2021; Zhang et al., 2020; Yu et al., 2022) منطبق بوده و اهمیت انجام مطالعات میدانی درباره انتقال میکروپلاستیک‌ها در رخدادهای واقعی بارندگی را بیش از پیش آشکار می‌سازد به طوری که اندازه ذره یک پارامتر کنترل‌کننده اصلی در سرنوشت میکروپلاستیک است. ذرات ۶۳ تا ۱۲۵ میکرومتر رفتار متفاوت تری داشته و پتانسیل آلودگی‌زایی برای منابع آب زیر زمینی را دارند، درحالی‌که ذرات ۲۵۰ تا ۵۰۰ میکرومتر بیشتر در سطح خاک حرکت کرده و یک منبع آلاینده طولانی مدت برای آب های سطحی هستند.

۴-۳ غنی‌شدگی میکروپلاستیک در رسوب

بررسی نسبت غنی‌شدگی میکروپلاستیک‌ها در رسوب خروجی نشان می‌دهد که الگوی تغییرات این شاخص در کرت‌های دارای پوشش گیاهی و فاقد پوشش متفاوت است و علاوه بر این، رفتار دو کلاس اندازه‌ای میکروپلاستیک‌ها نیز تا حدی متفاوت بوده است. به طور کلی، در هر دو بازه اندازه‌ای ۶۳–۱۲۵ و ۲۵۰–۵۰۰ میکرومتر، نسبت غنی‌شدگی در رسوب خروجی از کرت‌های دارای پوشش گیاهی در طی رخدادهای بارندگی افزایش یافته، در حالی که در کرت‌های فاقد پوشش روندی کاهشی مشاهده شده است. این در حالی است که الگوی تولید رسوب در این کرت‌ها روندی معکوس را نشان می‌دهد؛ به عبارت دیگر، در شرایطی که مقدار کل رسوب در کرت‌های فاقد پوشش بیشتر بوده است، غنی‌شدگی

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

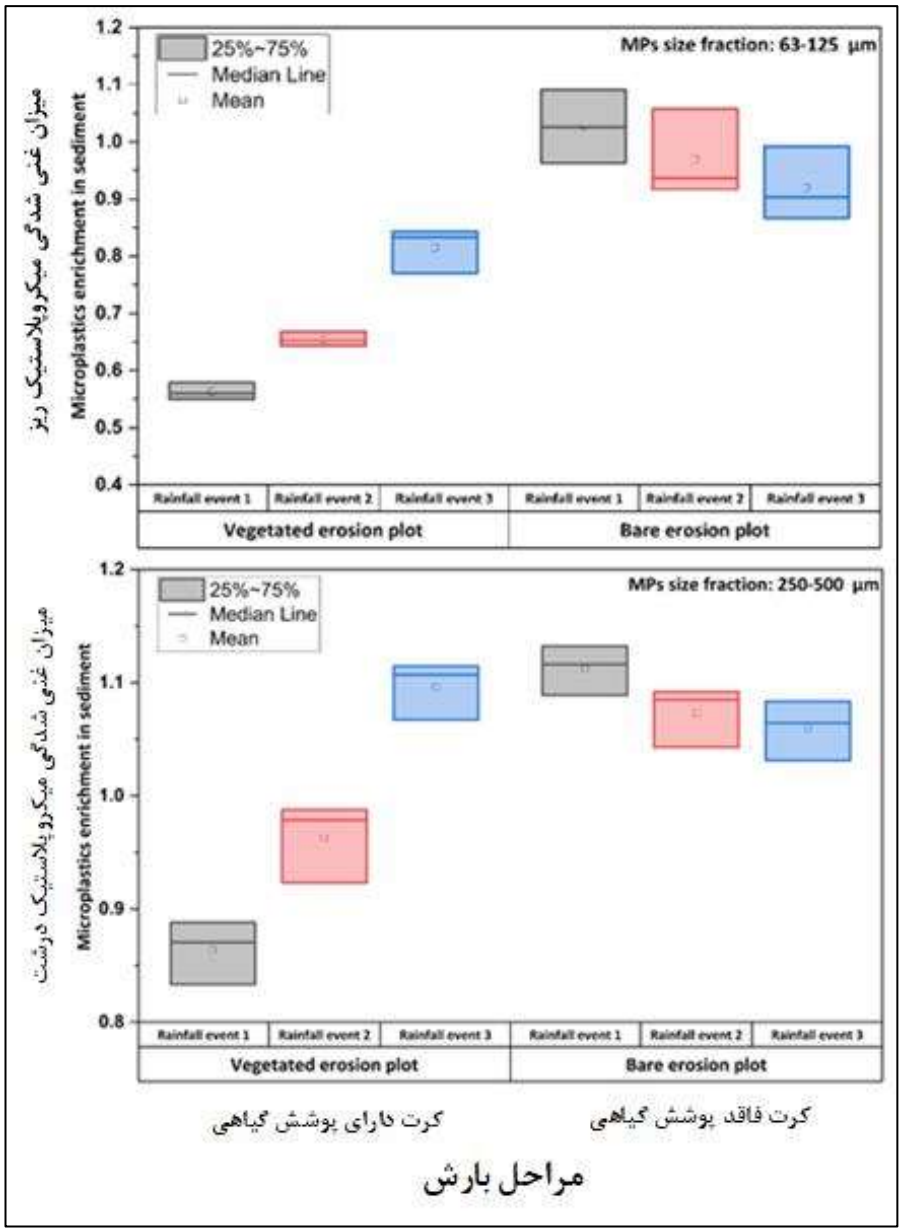
[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]

میکروپلاستیک‌ها کاهش یافته و در مقابل، در کرت‌های دارای پوشش با وجود تولید رسوب کمتر، غنی‌شدگی میکروپلاستیک‌ها افزایش یافته است (شکل ۴).

در کلاس اندازه‌ای ۶۳–۱۲۵ میکرومتر، مقدار نسبت غنی‌شدگی در کرت‌های دارای پوشش گیاهی از رخداد اول به سوم افزایش محسوسی نشان می‌دهد، در حالی که در کرت‌های فاقد پوشش مقدار این شاخص به تدریج کاهش می‌یابد. این الگو نشان می‌دهد که در شرایط وجود پوشش گیاهی، میکروپلاستیک‌های ریز نسبت به ذرات معدنی خاک با کارایی بیشتری در رسوب خروجی متمرکز می‌شوند. یکی از دلایل احتمالی این پدیده، نقش پوشش گیاهی در کاهش انرژی جنبشی قطرات باران و سرعت رواناب است. کاهش انرژی فرسایشی موجب می‌شود انتقال ذرات درشت‌تر خاک محدود شود، در حالی که ذرات سبک‌تر و کوچک‌تر مانند میکروپلاستیک‌ها همچنان قابلیت جابه‌جایی داشته باشند. در نتیجه، با کاهش انتقال ذرات معدنی درشت، سهم نسبی میکروپلاستیک‌ها در رسوب افزایش یافته و نسبت غنی‌شدگی بالا می‌رود. در مقابل، در کرت‌های فاقد پوشش، شدت فرسایش و انتقال ذرات معدنی بیشتر است و مقدار زیادی از ذرات خاک همراه با رواناب منتقل می‌شوند؛ بنابراین میکروپلاستیک‌ها در میان حجم زیاد رسوبات معدنی رقیق شده و نسبت غنی‌شدگی کاهش می‌یابد.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]



شکل ۴- نسبت غنی‌شدگی میکروپلاستیک در رسوب خروجی از کرت‌های فرسایشی طی سه رخداد بارندگی

در کلاس اندازه‌ای درشت‌تر (۲۵۰–۵۰۰ میکرومتر) نیز روند مشابهی مشاهده می‌شود، به طوری که در کرت‌های دارای پوشش گیاهی نسبت غنی‌شدگی در طول رخدادهای بارندگی افزایش یافته و در کرت‌های فاقد پوشش کاهش نشان می‌دهد (شکل ۴). با این حال، مقادیر این شاخص در این کلاس اندازه‌ای عموماً بالاتر از کلاس ریزتر است. این امر می‌تواند ناشی از ویژگی‌های فیزیکی میکروپلاستیک‌ها از جمله چگالی کم، شکل نامنظم و رفتار هیدرودینامیکی متفاوت نسبت به ذرات معدنی باشد. بسیاری از میکروپلاستیک‌ها دارای چگالی کمتر از کانی‌های خاک هستند و حتی در اندازه‌های نسبتاً بزرگ نیز می‌توانند در جریان‌های با انرژی پایین‌تر جابه‌جا شوند. در کرت‌های دارای پوشش گیاهی که

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]

سرعت رواناب کاهش می‌یابد، این ویژگی سبب می‌شود میکروپلاستیک‌ها همچنان قابلیت انتقال داشته باشند، در حالی که بخش قابل توجهی از ذرات معدنی در محل باقی می‌مانند و همین امر موجب افزایش غنی‌شدگی می‌شود.

بر اساس فرآیندهای فرسایش و انتقال رسوب، پوشش گیاهی با افزایش زبری سطح، کاهش سرعت رواناب و افزایش نفوذپذیری خاک، انتقال انتخابی ذرات را تقویت می‌کند و ذرات سبک‌تر مانند میکروپلاستیک‌ها ممکن است نسبت به ذرات معدنی خاک بیشتر در رسوبات خروجی متمرکز شوند.

این الگو با یافته‌های برخی مطالعات پیشین همخوانی دارد که نشان داده‌اند میکروپلاستیک‌ها به دلیل چگالی پایین‌تر و سطح ویژه بیشتر، رفتار انتقالی متفاوتی نسبت به ذرات معدنی خاک دارند و می‌توانند حتی در شرایط جریان‌های با انرژی کمتر نیز جابه‌جا شوند. مطالعاتی مانند Nizzetto و همکاران (۲۰۱۶) و Hurley و Nizzetto (۲۰۱۸) نشان داده‌اند که فرسایش خاک و رواناب سطحی از مهم‌ترین مسیرهای انتقال میکروپلاستیک‌ها از خاک به محیط‌های آبی هستند، اما ترکیب رسوبات منتقل‌شده می‌تواند به شدت تحت تأثیر شرایط سطح زمین و پوشش گیاهی قرار گیرد. همچنین نتایج Zhang و همکاران (۲۰۲۰) و O'Connor و همکاران (۲۰۱۹) نشان می‌دهد که در جریان‌های کم‌انرژی، ذرات پلاستیکی به دلیل چگالی کمتر نسبت به ذرات معدنی، تحرک بیشتری دارند و می‌توانند به صورت انتخابی در رسوبات معلق غنی شوند.

علاوه بر این، برخی پژوهش‌ها اشاره کرده‌اند که پوشش گیاهی می‌تواند موجب افزایش گیراندازی ذرات معدنی در سطح خاک شود، در حالی که ذرات سبک‌تر مانند میکروپلاستیک‌ها به راحتی همراه رواناب منتقل می‌شوند (Dong et al., 2021). این سازوکار می‌تواند توضیح دهد که چرا در شرایط کاهش تولید رسوب، نسبت غنی‌شدگی میکروپلاستیک‌ها افزایش یافته است.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که رابطه بین تولید رسوب و انتقال میکروپلاستیک‌ها الزاماً مستقیم نیست و شرایط سطحی زمین، به ویژه وجود پوشش گیاهی، می‌تواند الگوی انتقال انتخابی این ذرات را تغییر دهد. بنابراین، در ارزیابی خطر انتقال میکروپلاستیک‌ها از خاک به سامانه‌های آبی، علاوه بر میزان فرسایش خاک، باید به ویژگی‌های سطح زمین، پوشش گیاهی و ویژگی‌های فیزیکی ذرات میکروپلاستیک نیز توجه شود.

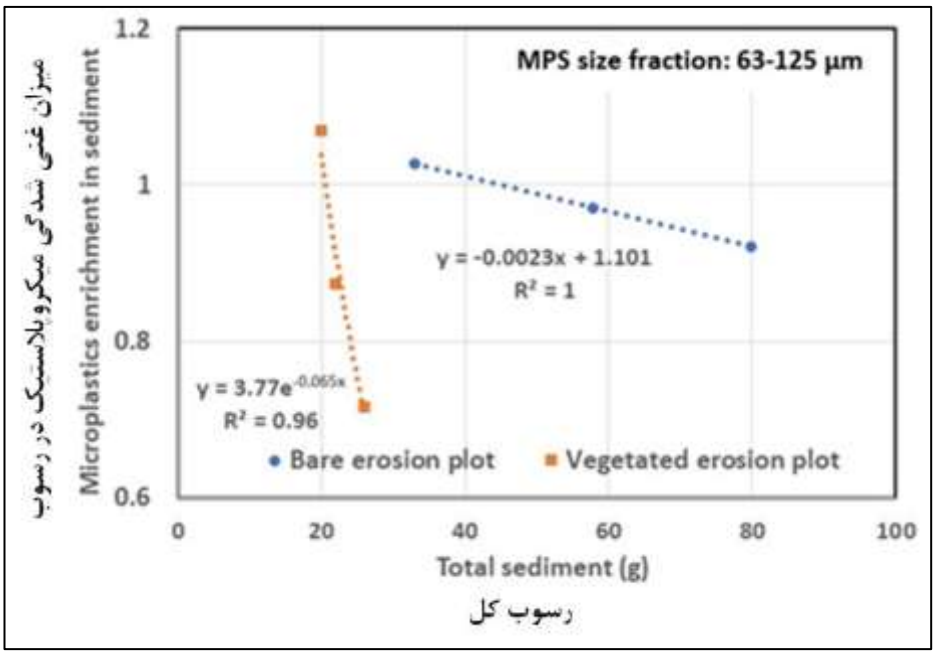
به‌منظور بررسی نقش شدت فرسایش در انتقال انتخابی میکروپلاستیک‌ها، رابطه بین نسبت غنی‌شدگی این ذرات و مقدار رسوب کل خروجی از کرت‌های فرسایشی تحلیل شد. نتایج نشان داد که در هر دو کلاس اندازه‌ای ۶۳–۱۲۵ و ۲۵۰–۵۰۰ میکرومتر، بین مقدار رسوب تولیدی و نسبت غنی‌شدگی میکروپلاستیک‌ها رابطه معکوس وجود دارد، به‌طوری‌که با افزایش رسوب کل، مقدار غنی‌شدگی کاهش یافته است. این رابطه در کرت‌های فاقد پوشش به صورت خطی و در

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]

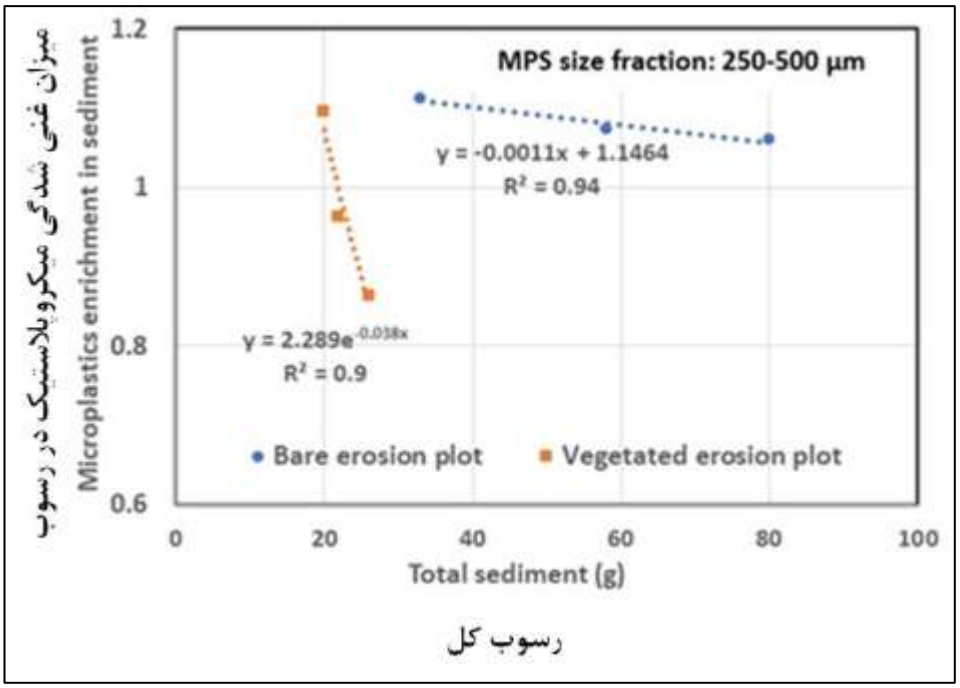
کرت‌های دارای پوشش به صورت نمایی مشاهده شد که بیانگر تفاوت در سازوکارهای حاکم بر فرسایش و انتقال ذرات در این دو شرایط سطحی است (شکل ۵).

در کرت‌های فاقد پوشش، افزایش مقدار رسوب عمدتاً ناشی از شدت بیشتر فرسایش ورقه‌ای و برخورد مستقیم قطرات باران با سطح خاک است که منجر به جداشدگی و انتقال گسترده ذرات معدنی می‌شود. در چنین شرایطی، حجم زیادی از ذرات خاک وارد جریان رواناب شده و ترکیب رسوب خروجی عمدتاً تحت کنترل ذرات معدنی قرار می‌گیرد. در نتیجه، حتی اگر میکروپلاستیک‌ها نیز همراه جریان منتقل شوند، سهم نسبی آن‌ها در میان رسوبات کاهش یافته و نسبت غنی‌شدگی افت می‌کند. مطالعات انجام‌شده در زمینه انتقال میکروپلاستیک‌ها در خاک نیز نشان داده‌اند که در شرایط جریان‌های پرانرژی و تولید رسوب بالا، ترکیب رسوبات عمدتاً تحت سلطه ذرات معدنی بوده و سهم نسبی میکروپلاستیک‌ها کاهش می‌یابد (Nizzetto, 2018 & Hurley ؛Amelung, 2018 & Bläsing).



[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]



شکل ۵- ارتباط بین نسبت غنی‌شدگی میکروپلاستیک با رسوب کل خروجی از کرت فرسایشی.

در مقابل، در کرت‌های دارای پوشش گیاهی اگرچه مقدار رسوب تولیدی کمتر است، اما نسبت غنی‌شدگی میکروپلاستیک‌ها در مقادیر بالاتری باقی می‌ماند و با تغییرات رسوب، روندی نمایی نشان می‌دهد. حضور پوشش گیاهی با کاهش انرژی جنبشی قطرات باران، افزایش زبری سطح و کاهش سرعت رواناب، باعث محدود شدن جداشدگی و انتقال ذرات معدنی خاک می‌شود. در چنین شرایطی، بخش قابل توجهی از ذرات معدنی در محل باقی مانده یا در فواصل کوتاه ته‌نشین می‌شوند، در حالی که میکروپلاستیک‌ها به دلیل ویژگی‌های فیزیکی خاص خود همچنان قابلیت انتقال در جریان رواناب را حفظ می‌کنند. بسیاری از پلیمرهای رایج دارای چگالی کمتر یا نزدیک به چگالی آب هستند و همین ویژگی باعث می‌شود حتی در جریان‌های با انرژی کمتر نیز بتوانند در حالت معلق یا نیمه‌معلق باقی بمانند. بنابراین با کاهش انتقال ذرات معدنی، سهم نسبی میکروپلاستیک‌ها در رسوب خروجی افزایش یافته و مقدار غنی‌شدگی در سطح بالاتری قرار می‌گیرد. چنین رفتار انتقالی انتخابی برای ذرات سبک‌تر در محیط‌های خاکی توسط Nizzetto و همکاران (۲۰۱۶) و Dong و همکاران (۲۰۲۱) نیز گزارش شده است.

نتایج این پژوهش نشان داد که میکروپلاستیک ریزودرشت رفتار متفاوتی در فرایند فرسایش آبی دارند. ذرات درشت‌تر تمایل بیشتری به انتقال افقی و تجمع در پایین‌دست کرت‌ها نشان دادند، درحالی‌که کاهش میکروپلاستیک ریز در خاک لزوماً با افزایش متناظر آن‌ها در رسوب همراه نبود. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده انتقال عمودی ذرات ریز به لایه‌های عمیق‌تر خاک از طریق نفوذ آب و فعالیت‌های زیستی باشد؛ پدیده‌ای که در مطالعات He et al. (۲۰۲۰) و Rehm و

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]

Fiener (۲۰۲۴) نیز گزارش شده است. از دیدگاه مکانیک فرسایش، ذرات میکروپلاستیک درشت از ذرات رسوبی زودتر از آنچه توسط نمودار شیلدز پیش‌بینی می‌شود، به حرکت درمی‌آیند، درحالی‌که ذرات ریز میکروپلاستیک دیرتر از ذرات معدنی هم‌اندازه خود وارد حرکت می‌شوند. این پدیده به دلیل قرارگرفتن ذرات ریز میکروپلاستیک در پناه ذرات معدنی درشت و در مقابل، قرارگیری مستقیم ذرات درشت میکروپلاستیک در معرض تنش برشی جریان رخ می‌دهد (Schüttrumpf, 2019 & Waldschläger). یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات انجام‌شده در اراضی کشاورزی (Rehm et al., 2021) هم‌خوانی داشته و نشان می‌دهد که اراضی مرتعی، به‌ویژه در شرایط تخریب پوشش گیاهی، می‌توانند به منابع فعال و پایدار انتقال میکروپلاستیک به اکوسیستم‌های آبی تبدیل شوند. بدین ترتیب اندازه میکروپلاستیک‌ها نقش مهمی در کنترل الگوی انتقال آن‌ها در فرایندهای فرسایشی ایفا می‌کند و بنابراین در ارزیابی مسیرهای انتقال این آلاینده‌ها از خاک به سامانه‌های آبی باید علاوه بر میزان فرسایش، شرایط پوشش سطح زمین و ویژگی‌های ذرات نیز مورد توجه قرار گیرد.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش به طور روشن نشان داد که فرسایش آبی ناشی از رخدادهای بارش طبیعی می‌تواند نقش مؤثری در جابه‌جایی و انتقال میکروپلاستیک از خاک‌های مرتعی ایفا کند، به‌ویژه در شرایطی که پوشش گیاهی سطح خاک حذف یا تضعیف شده باشد. کاهش معنی‌دار غلظت میکروپلاستیک درشت در لایه سطحی خاک (صفر تا ۱۰ سانتی‌متر) هم‌زمان با افزایش آن‌ها در رسوبات خروجی، بیانگر فعال بودن مسیر انتقال جانبی میکروپلاستیک تحت تأثیر رواناب و فرسایش است. در مقابل کاهش معنی دار غلظت میکروپلاستیک ریز در لایه سطحی خاک و عدم افزایش آن ها در رسوبات خروجی، بیانگر انتقال عمودی میکروپلاستیک ریز تحت تاثیر زیر و رو شدن خاک سطحی و نفوذ عمقی آنها توسط آب است. مقایسه تیمارها نشان داد که کرت بدون پوشش گیاهی، به دلیل افزایش تولید رواناب و رسوب، بیشترین میزان کاهش میکروپلاستیک در خاک و بیشترین انتقال آن‌ها به رسوب را تجربه کرده است، درحالی‌که وجود پوشش گیاهی توانسته است با کاهش انرژی جریان و تثبیت خاک، انتقال میکروپلاستیک را به طور قابل‌توجهی محدود کند. همچنین، نتایج نسبت غنی‌شدگی (ER) نشان داد که با افزایش شدت فرسایش و تولید رسوب نسبت غنی‌شدگی افزایش می‌یابد. در مجموع، یافته‌های این مطالعه تأکید می‌کند که اراضی مرتعی تخریب‌شده می‌توانند به‌عنوان منابع فعال و پایدار میکروپلاستیک برای اکوسیستم‌های پایین‌دست عمل کنند. ازاین‌رو، حفظ و احیای پوشش گیاهی مراتع، در کنار مدیریت رواناب سطحی، می‌تواند راهکاری مؤثر برای کاهش انتقال میکروپلاستیک و جلوگیری از آلودگی سامانه‌های آبی باشد. در مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردد انتقال عمودی میکروپلاستیک و احتمال راه یافتن آنها به سفره های آب زیرزمینی بررسی شود.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]

منابع

Andreu, V., Rubio, J. L., & Cerni, R. (1994). Effects of Mediterranean shrub cover on water erosion. Journal of Environmental Management, 41, 337–349. Blackwell Publishing.

Aurisano, N., Belleri, G., Giacomazza, D., & Testini, M. (2021). Chemical additives in microplastics: A review of their occurrence, environmental fate, and impact. Environmental Science and Pollution Research, 28(40), 56043–56059. https://doi.org/10.1007/s11356-021-14284-9

Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 364(1526), 1985–1998. https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205

Bläsing, M., & Amelung, W. (2018). Plastics in soil: Analytical methods and possible sources. Science of the Total Environment, 612, 422–435. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.057

Bullard, J. E., Ockelford, A., O'Brien, P., & McKenna Neuman, C. (2018). Preferential transport of microplastics by wind and water: A conceptual framework. Atmospheric and Earth Surface Processes, 4(2), 150-165. https://doi.org/10.5194/asep-4-150-2018

Chae, J., & An, J. Y. (2020). Microplastics in soil: A review of methods, occurrence, and effects. Journal of Hazardous Materials, 394, 122564. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122564

Chae, Y., & An, Y. J. (2018). Microplastics in soil: Occurrence, environmental fate, and ecological effects. Environmental Pollution, 232, 680-693. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.09.051

Chaurasia, R., Yadav, P., Kumar, P., & Singh, A. (2024). Atmospheric deposition of microplastics in terrestrial ecosystems: A review. Environmental Science and Pollution Research, 31(2), 1387–1405. https://doi.org/10.1007/s11356-023-31304-9

Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. Marine Pollution Bulletin, 62(12), 2588–2597. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025

Crossman, J., Hurley, R. R., Futter, M., & Nizzetto, L. (2020). Transfer of microplastics from river catchments to the sea: The role of reservoirs and erosion processes. Water Research, 186, 116-129. https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116129

De Baets, S., Poesen, J., Knapen, A., Barberá, G. G., & Navarro, J. A. (2007). Root effects on resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. Earth Surface Processes and Landforms, 32(10), 1474-1490.

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. https://doi.org/10.1111/gcb.14017

Dong, Y., Gao, M., Qiu, W., Song, Z., & Song, Y. (2021). Transport of microplastics in soil and surface runoff: A review. Science of the Total Environment, 757, 143714. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143714

Esterhuizen, J., & Kim, K. H. (2022). Microplastics in terrestrial ecosystems: A review of sources, distribution, and ecological impacts. Environmental Research, 206, 112177. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112177

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. Science Advances, 3(7), e1700782. https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782

Guo, Z. L., Li, P., Yang, X., & Wang, Z. (2020). Effects of vegetation cover on the transport of low-density polyethylene microplastics in runoff and sediment. Science of the Total Environment, 715, 136-148. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136148

Gyssels, G., Poesen, J., Bochet, E., & Li, Y. (2005). Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review. Progress in Physical Geography, 29(2), 189–217. https://doi.org/10.1191/0309133305pp441pr

Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E., & Purnell, P. (2018). An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. Journal of Hazardous Materials, 344, 179–199. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.014

He, D., Luo, Y., Lu, S., Liu, M., Song, Y., & Lei, L. (2020). Microplastics in soils: Analytical methods, pollution characteristics and ecological risks. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 109, 163–172. https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.01.014

Horton, A. A., & Dixon, S. J. (2018). Microplastics: An introduction to environmental transport processes. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 5, e1268. https://doi.org/10.1002/wat2.1268

Horton, A. A., & Dixon, S. M. (2018). Microplastic contamination in terrestrial ecosystems: A review of impacts and mitigation strategies. Environmental Science and Pollution Research, 25(14), 13677–13690. https://doi.org/10.1007/s11356-018-1872-5

Horton, A. A., Walton, A., Spurgeon, D. J., Lahive, E., & Svendsen, C. (2017). Microplastics in freshwater and terrestrial environments. Science of the Total Environment, 586, 127–141. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.061

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 sources, fate, and effects. Environmental Pollution, 227, 75-85. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.04.059

Hurley, R. R., & Nizzetto, L. (2018). Fate and occurrence of micro(nano)plastics in soils: Knowledge gaps and possible risks. Current Opinion in Environmental Science & Health, 1, 6–11. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.006

Hydrological Processes, 19, 2815–2844.

Khalid, A., Hasan, A., Khan, S. A., & Al-Thani, N. (2020). Microplastic pollution in freshwater ecosystems: A review of sources, occurrence, and ecological effects. Environmental Pollution, 265(Pt B), 114957. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114957

Kim, S. K., Kim, J. S., & Lee, Y. K. (2021). Vertical transport of microplastics in soil columns: Implications for groundwater pollution. Journal of Hazardous Materials, 403, 123-138.

Kinnell, P. I. A. (2005). The universal soil loss equation for predicting sediment yield. Journal of Hydrology, 304(1-4), 225–238. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.07.015

Kinnell, P. I. A. (2005). Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: A review.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]

Li, X., Yang, D., Lv, S., & Rillig, M. C. (2019). Microplastic in agricultural soils: Sources, distribution, and ecological impacts. Environmental Pollution, 254, 113025. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113025

Li, Z., Liu, W., Zhang, X., & Zheng, F. (2014). Impacts of land use change and vegetation restoration on soil erosion in the Loess Plateau. Catena, 118, 15–24.

Lv, S., Li, X., Feng, Q., Yang, D., & Rillig, M. C. (2019). Microplastics in soils: A review of methods, sources, and impacts. Environmental Pollution, 254, 113025. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113025

Morgan, R. P. C. (2005). Soil erosion and conservation (3rd ed.). Blackwell Publishing.

Nearing, M. A. (2001). Field-scale process-based erosion modeling. Transactions of the ASAE, 44(1), 57–65. https://doi.org/10.13031/2013.5917

Nearing, M. A., et al. (2017). Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. Catena, 61, 131–154.

Nearing, M. A., Foster, G. R., Lane, L. J., & M Guggenheim, A. (1999). Runoff and erosion in highly dissected landscapes. Water Resources Research, 35(12), 3605–3615. https://doi.org/10.1029/1999WR900183

Nizzetto, L., Futter, M., & Langaas, S. (2016). Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? Environmental Science & Technology, 50(20), 10777–10779. https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04140

O'Connor, D., Pan, S., Shen, Z., Song, Y., Jin, Y., Wu, W. M., & Hou, D. (2019). Microplastics undergo accelerated vertical migration in sand soil due to small size and wet-dry cycles. Environmental Pollution, 249, 527–534. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.092

Pan, C., & Shangguan, Z. (2006). Runoff hydraulic characteristics and sediment generation in sloped grassplots under simulated rainfall conditions. Journal of Hydrology, 331(1–2), 178–185. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.05.011

Pan, C., & Shangguan, Z. (2006). Runoff and sediment loss responses to vegetation restoration in the Loess Plateau of China. Catena, 64, 39–47.

PlasticsEurope. (2023). Plastics – the Facts 2023: An analysis of European plastics production, demand and waste data. PlasticsEurope Association.

Rehm, R., & Fiener, P. (2024). Lateral transport of microplastics by water erosion. Earth Surface Processes and Landforms, 49, 1123–1138.

Rehm, R., & Fiener, P. (2024). Vertical and lateral transport pathways of microplastics in soils. Journal of Hazardous Materials, 455, 131527. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131527

Rehm, R., Zeyer, J., & Fiener, P. (2021). Soil erosion as a driver for microplastic transport to surface waters. Science of the Total Environment, 755, 142547. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142547

Rehm, R., Zeyer, T., Schmidt, A., & Fiener, P. (2021). Microplastic transport via soil erosion. Science of the Total Environment, 785, 147267.

Rehm, R., Zummack, J., Ackermann, A., & Gerke, H. H. (2021). Erosional transport of microplastic fibers and particles from soil surfaces by runoff. Catena, 196, 104-118.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]

Ren, Z., Xu, J., Wang, J., Xu, W., Li, Y., & Zhang, Y. (2021). Sources and fate of microplastics in agricultural soils: A review. Environmental Science and Pollution Research, 28(32), 43407–43422. https://doi.org/10.1007/s11356-021-15219-z

Rillig, M. C. (2012). Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? Environmental Science and Pollution Research, 19(6), 1440–1441. https://doi.org/10.1007/s11356-012-0818-7

Rillig, M. C., Lehmann, A., de Souza Machado, A. A., & Yang, G. (2021). Microplastic effects on plants. New Phytologist, 223(3), 1066–1070. https://doi.org/10.1111/nph.15794

Rillig, M. C., Lehmann, A., de Souza, L. S., Yang, G., & Yang, D. (2021). Microplastic contamination in soils: A global overview. Environmental Science & Technology, 55(9), 5781–5786. https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06752

Rillig, M. C., Lehmann, J., de Souza, L. S., Yang, G., & Vorasoot, N. (2021). The role of soil in the global plastic crisis. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 376(1734), 20200077. https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0077

Rillig, M. C., Ziersch, L., & Hempel, S. (2017). Microplastic transport in soil by earthworms. Science of the Total Environment, 612, 422–435. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.086

Scientific Reports, 7, 1362.

Sillanpää, M., & Sainio, P. (2017). Release of microplastics from agricultural soil to water bodies under simulated rainfall. Environmental Pollution, 226, 25-33.

Thompson, R. C., Olsen, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W., McGonigle, D., & Russell, A. E. (2004). Lost at sea: Where is all the plastic? Science, 304(5672), 838. https://doi.org/10.1126/science.1094559

Toy, T. J., Foster, G. R., & Renard, K. G. (2002). Soil erosion: Processes, measurements, and control. John Wiley & Sons.

Turner, A., & Filella, M. (2021). Environmental chemistry of microplastics and additives. Environmental Chemistry, 18(3), 119-133. https://doi.org/10.1071/EN20218

Waldschläger, K., & Schüttrumpf, H. (2019). Effects of particle properties on the transport of microplastics in sediment. Environmental Science & Technology, 53(4), 1958–1966. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06794

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Science and Education Administration (Agriculture Handbook No. 537).

Yang, J., Li, R., Zhou, Q., & Li, L. (2021). Migration and retention of microplastics in soil: The effects of particle size and soil cover. Chemosphere, 264, 128-142.

Yang, J., Zhang, J., Wang, S., Li, H., & Liu, X. (2023). Impact of vegetation cover on microplastic transport in soils: A review. Environmental Science and Pollution Research, 30(15), 43603–43617. https://doi.org/10.1007/s11356-023-26850-0

Yu, H., Yang, X., Li, Y., et al. (2022). Transport of microplastics in soil by surface runoff and soil erosion processes. Science of the Total Environment, 806, 150–650. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150650

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]

Zhang, G. H., Liu, G. B., Wang, G. L., & Wang, Y. X. (2010). Effects of vegetation cover on runoff and soil loss in the Loess Plateau of China. Catena, 81, 1–8.

Zhang, G. S., & Liu, Y. F. (2018). The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China. Science of the Total Environment, 642, 12–20. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.004

Zhang, S., Liu, X., Hao, X., & Wang, J. (2020). Distribution of microplastics in soil aggregates and their response to water erosion. Environmental Pollution, 258, 113-125.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.7]