

اثر متقابل کاربری اراضی و ویژگی‌های بارندگی بر غلظت و بار انتقالی سرب و کادمیوم در رواناب سطحی حوزه آبخیز کوه‌دشت

چکیده

انتقال فلزات سنگین از سطح خاک توسط رواناب یکی از مسیرهای مهم ورود آلاینده‌ها به منابع آب سطحی است. این پژوهش با هدف بررسی اثر کاربری اراضی، شدت و مدت بارندگی بر غلظت و بار انتقالی سرب (Pb) و کادمیوم (Cd) و ارتباط آن با رواناب و رسوب در حوزه آبخیز کوه‌دشت استان لرستان انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل نوع کاربری اراضی (اراضی کشاورزی، مرتع و جنگل)، شدت بارندگی (شدت ۵۰، ۷۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت) و مدت زمان (زمان ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه) می‌باشد که در سه تکرار انجام شد. در مجموع، ۸۱ آزمایش شبیه‌ساز باران اجرا و غلظت Pb و Cd در رواناب، حجم رواناب و مقدار رسوب اندازه‌گیری شد. بار انتقالی فلزات بر اساس غلظت و حجم رواناب محاسبه شد. نتایج نشان داد که کاربری اراضی و شدت بارندگی بر غلظت و بار انتقالی Pb و Cd اثر معنی‌داری داشتند و الگوی اثرات متقابل عوامل برای دو فلز متفاوت بود. با توجه به نتایج میانگین بار Cd و Pb در اراضی جنگلی به ترتیب $5/60$ و $2/79 \text{ mg m}^{-2}$ و $9/97 \text{ mg m}^{-2}$ و $4/07 \text{ mg m}^{-2}$ در مرتع و کشاورزی بیشتر بود ($p < 0/05$). بیشترین بار Cd ($9/97 \text{ mg m}^{-2}$) و Pb ($4/07 \text{ mg m}^{-2}$) در مرتع کشاورزی و جنگلی و شدت ۹۰ میلی‌متر بر ساعت مشاهده شد. بار هر دو فلز با افزایش شدت بارندگی افزایش یافت و با حجم رواناب و مقدار رسوب همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت. در مجموع، شدت بارندگی و کاربری اراضی بر انتقال Pb و Cd مؤثر بودند و بررسی بار انتقالی در کنار غلظت، ارزیابی بهتری از خروج فلزات فراهم کرد. از نظر مدیریتی، مدیریت رواناب و فرسایش و حفظ پوشش گیاهی و نوارهای حائل، به‌ویژه در بارندگی شدید، می‌تواند انتقال Pb و Cd به آب‌های سطحی را کاهش دهد.

کلید واژه‌ها: آلودگی آب، بار انتقالی، شبیه‌ساز باران، فلزات سنگین

Interactive Effects of Land Use and Rainfall Characteristics on Lead and Cadmium Concentrations and Loads in Runoff from the Kuhdasht Watershed

ABSTRACT

Heavy metal transport from the soil surface by runoff is an important pathway for pollutant entry into surface water resources. This study investigated the effects of land use, rainfall intensity, and duration on the concentration and load of lead (Pb) and cadmium (Cd) and their relationships with runoff and sediment in the Kuhdasht watershed, Lorestan Province, Iran. Treatments included three land uses (agriculture, rangeland, and forest), three rainfall intensities (50, 70, and 90 mm h⁻¹), and three durations (5, 10, and 15 min), with three replications. 81 rainfall-simulation experiments were conducted. Runoff volume, sediment yield, and Pb and Cd concentrations in runoff were measured, and metal loads were calculated. Land use and rainfall intensity significantly affected the concentrations and loads of both metals, with different interaction patterns. Mean Cd and Pb loads in forest land were 5.60 and 2.79 mg m⁻², respectively, exceeding those in rangeland and agricultural land ($p < 0.05$). The highest Cd (9.97 mg m⁻²) and Pb (4.07 mg m⁻²) loads occurred under forest land use at 90 mm h⁻¹. Both metal loads increased with rainfall intensity and were positively correlated with runoff volume and sediment yield. Rainfall intensity and land use affected Pb and Cd transport, and evaluating transported loads alongside concentrations provided a better assessment of metal loss from the soil surface. From a management perspective, runoff and erosion control, vegetation cover maintenance, and buffer strips, particularly under high-intensity rainfall, can reduce Pb and Cd transport to surface waters.

Keywords: Heavy metals, Rainfall simulator, Transport load, Water pollution

EXTENDED ABSTRACT

Introduction and Goal

The transport of heavy metals from soil surfaces by runoff is an important pathway for the transfer of contaminants to surface water resources. Lead (Pb) and cadmium (Cd) are among the environmentally important heavy metals because of their toxicity, persistence, and potential accumulation in soils and aquatic ecosystems. During rainfall events, these elements can be transported

from soil surfaces through runoff and erosion processes. Rainfall intensity and duration influence runoff generation, soil detachment, and sediment transport, while land use affects these processes through differences in vegetation cover, soil surface conditions, infiltration, and land management. Therefore, understanding the combined effects of land use and rainfall characteristics is important for evaluating heavy metal transport from soil surfaces. Although many studies have evaluated heavy metal concentrations in runoff, concentration alone does not indicate the total amount of metal removed from the soil surface. Metal load, calculated from concentration and runoff volume, provides a more direct measure of the amount of contaminant transported from a given area. Accordingly, this study aimed to investigate the effects of land use, rainfall intensity, rainfall duration, and their interactions on Pb and Cd concentrations and loads in runoff and to determine their relationships with runoff volume and sediment yield in the Kuhdasht watershed, Lorestan Province, Iran.

Materials and Methods

The study was conducted using a portable rainfall simulator under controlled experimental conditions. The experiment included three land uses (agricultural land, rangeland, and forest), three rainfall intensities (50, 70, and 90 mm h⁻¹), and three rainfall durations (5, 10, and 15 min), with three replications. In total, 81 rainfall simulation experiments were conducted. Runoff was collected at the end of each experiment, and its volume was determined. Sediment transported by runoff was also collected and quantified. Runoff samples were analyzed for Pb and Cd concentrations using atomic absorption spectrometry. Metal loads were calculated from their concentrations and runoff volume and expressed per unit area. The data were analyzed using analysis of variance in SAS 9.4, and treatment means were compared using Tukey's test at the 5% probability level. Pearson correlation analysis was used to evaluate the relationships between Pb and Cd loads, runoff volume, and sediment yield.

Results and Discussion

The results showed that land use, rainfall intensity, and rainfall duration significantly affected runoff and sediment production. Mean runoff volume increased from 66.96 mL at 50 mm h⁻¹ to 183.59 and 297.74 mL at 70 and 90 mm h⁻¹, respectively. Mean runoff volumes at 5, 10, and 15 min were 128.70, 181.81, and 237.78 mL, respectively. The runoff model was highly significant ($R^2 = 0.8996$), indicating that the experimental factors and their interactions explained a substantial proportion of the variation in runoff. Sediment yield was also strongly affected by the experimental factors, with a high coefficient of determination ($R^2 = 0.9619$).

Land use and rainfall intensity significantly affected both the concentrations and loads of Pb and Cd, although the patterns of interaction differed between the two metals and between concentration and load. The mean Pb and Cd loads in forest land were 2.79 and 5.60 mg m⁻², respectively, and were significantly higher than the corresponding values in rangeland and agricultural land ($p < 0.05$). The highest loads of Cd (9.97 mg m⁻²) and Pb (4.07 mg m⁻²) were observed under forest land use at the highest rainfall intensity (90 mm h⁻¹). In general, increasing rainfall intensity increased the loads of both metals. The results also showed that the interaction patterns were not identical for concentration and load. For Pb concentration, the land use $\times$ rainfall intensity interaction and the three-way interaction of land use $\times$ rainfall intensity $\times$ rainfall duration were significant, whereas the corresponding three-way interaction was not significant for Pb load. For Cd, the land use $\times$ rainfall intensity interaction significantly affected both concentration and load, while the three-way interaction was not significant.

Pearson correlation analysis revealed significant positive relationships between Pb load and runoff volume ($r = 0.770$) and sediment yield ($r = 0.644$), as well as between Cd load and runoff volume ($r = 0.740$) and sediment yield ($r = 0.675$) ($p < 0.001$). These relationships indicate that greater runoff and sediment production were associated with greater amounts of Pb and Cd transported from the soil surface. The stronger correlations between metal loads and runoff volume compared with sediment yield highlight the important role of runoff in determining the total amount of dissolved and readily transported metals. Nevertheless, the significant relationships with sediment yield also demonstrate the contribution of erosion-related processes to heavy metal transport.

Conclusions

The findings demonstrated that rainfall intensity and land use were important factors affecting Pb and Cd transport from soil surfaces, while rainfall duration also influenced runoff and sediment production and contributed to variations in metal transport. High rainfall intensity resulted in greater runoff, sediment yield, and metal loads. The significant positive relationships between Pb and Cd loads and both runoff volume and sediment yield emphasize the close connection between hydrological and erosional processes and heavy metal transport. Differences between the responses of concentration and load further indicate that concentration alone may not adequately represent the actual amount of metal exported from the soil surface; therefore, metal load should be considered as a complementary measure for assessing heavy metal transport. From a management perspective, controlling runoff and erosion, particularly under intense rainfall, through maintaining vegetation cover, increasing surface protection, and establishing vegetative buffer strips may help reduce Pb and Cd transport to surface water resources. Since Pb and Cd concentrations in the sediment phase were not separately determined in the present study, further research should quantify both dissolved and sediment-associated fractions to better determine the relative contribution of these pathways to heavy metal transport.

مقدمه

خاک یکی از مهم‌ترین اجزای بوم‌سازگان‌های طبیعی، و بستر اصلی تولید غذا و تأمین خدمات زیستی است؛ با این حال، فعالیت‌های انسانی، تغییر کاربری اراضی و تغییر الگوی بارش می‌توانند پایداری آن را تحت تأثیر قرار داده و موجب انتقال آلاینده‌ها از سطح خاک به منابع آب شوند. در میان آلاینده‌های خاک، فلزات سنگین به دلیل ماندگاری، تجزیه‌ناپذیری و قابلیت تجمع، از مهم‌ترین تهدیدها برای کیفیت خاک و آب به شمار می‌روند. این عناصر می‌توانند از طریق فعالیت‌های کشاورزی، مصرف کودها و سموم شیمیایی، رسوب جوی و

فعالیت‌های صنعتی وارد خاک شده و در شرایط مناسب از طریق فرایندهای هیدرولوژیکی به خارج از محل اولیه آلودگی منتقل شوند (Alloway, 2013; Hou et al., 2020; Sharafi et al., 2026).

در میان فلزات سنگین، سرب^۱ (Pb) و کادمیوم^۲ (Cd) به دلیل سمیت، ماندگاری و پیامدهای بالقوه برای سلامت انسان و بوم‌سازگان اهمیت ویژه‌ای دارند (Kabata-Pendias, 2010). تحرک و قابلیت انتقال این عناصر در خاک به شکل شیمیایی، ماده آلی، pH، بافت و ویژگی‌های سطح خاک و همچنین شرایط هیدرولوژیکی وابسته است (McBride, 1994; Degryse et al., 2009; Alloway, 2013). با توجه به تحرک نسبتاً پایین فلزات سنگین در خاک، این عناصر عمدتاً از طریق جذب سطحی و اتصال به ذرات ریزدانه خاک و رسوبات فرسایش‌یافته جابه‌جا می‌شوند؛ با این حال، بخشی از فلزات سنگین، بسته به شکل شیمیایی آن، ویژگی‌های شیمیایی خاک و شرایط هیدرولوژیکی، می‌تواند در فاز محلول رواناب نیز انتقال یابد (Zhang et al., 2011). طی بارندگی، بخشی از فلزات به صورت محلول در رواناب و بخش دیگر از طریق جذب سطحی به ذرات خاک و رسوبات فرسایش‌یافته منتقل می‌شود (Zhang et al., 2011; Moghaddam et al., 2025). مطالعات جدید نیز نشان داده‌اند که فلزات سنگین، از جمله Pb و Cd، در رواناب و رسوبات ناشی از بارندگی حضور داشته و الگوی انتقال آن‌ها می‌تواند بین بخش محلول و ذره‌ای متفاوت باشد (Zhao et al., 2025). در یک مطالعه موردی در ایران نیز تجمع Pb و Cd در رسوبات حاصل از رواناب شهری با ویژگی‌هایی مانند اندازه ذرات و کربن آلی رابطه داشت (Moghaddam et al., 2025). از این رو، انتقال این عناصر در حوزه آبخیز از محل اولیه به مناطق پایین دست، تحت تأثیر متقابل ویژگی‌های شیمیایی و سطحی فلزات و فرایندهای بارش، رواناب، فرسایش و رسوب‌گذاری قرار دارد (Qiao et al., 2023; Moghaddam et al., 2025). از طرفی، ارزیابی انتقال فلزات تنها بر اساس غلظت (مقدار فلز در واحد حجم) آن‌ها در رواناب، نمی‌تواند مقدار واقعی فلز جابه‌جا شده را نشان دهد در حالی که بار انتقالی نشان‌دهنده جرم کل فلز منتقل شده از واحد سطح طی یک رخداد بارندگی است. در نتیجه، حجم رواناب می‌تواند رابطه مستقیم با بار انتقالی فلز داشته باشد (Kleinman et al., 2006). بنابراین، بررسی هم‌زمان غلظت و بار انتقالی Pb و Cd می‌تواند درک دقیق‌تری از میزان خروج آلاینده‌ها از سطح خاک و انتقال آن‌ها به مناطق پایین دست فراهم کند. شدت و مدت بارندگی و کاربری اراضی از طریق ایجاد تفاوت در شرایط سطح خاک، مقدار رواناب، فرسایش خاک و تولید رسوب را کنترل می‌نند (Qiao et al., 2023; Vaezi et al., 2025; Gómez & Nearing, 2005; Defersha and Melesse, 2012; Girmay et al., 2009). واعظی و همکاران (۱۴۰۳) و علی‌دوست و همکاران (۱۴۰۳) نشان دادند که الگوی زمانی شدت بارندگی می‌تواند رواناب و هدررفت خاک متفاوتی ایجاد و متعاقباً شرایط انتقال آلاینده‌ها را نیز تحت تأثیر قرار دهد. همچنین در دیگر مطالعات شبیه‌سازی بارندگی، رواناب و فرسایش، بر نقش موثر شدت و مدت بارندگی، شیب و شرایط سطح خاک در تولید رواناب و هدررفت خاک تأکید کرده‌اند (پرهمت و همکاران، ۱۳۹۳؛ خالدی درویشان و همکاران، ۱۳۹۵؛ واعظی و عبادی، ۱۳۹۶؛ معیری و همکاران، ۱۳۹۷؛ بیات و همکاران، ۱۴۰۰).

مطالعات بارندگی مصنوعی نشان داده‌اند که مقدار و مسیر انتقال فلزات سنگین به نوع کاربری اراضی و ویژگی ذرات خاک وابسته است. در پژوهشی در پنج کاربری حوزه غربی تیاکسی، مقدار انتقال فلزات بین کاربری‌ها متفاوت بود و ذرات ریز رسوب نقش مهمی در جابه‌جایی فلزات در رواناب داشتند؛ بنابراین، ارزیابی صرف بخش محلول می‌تواند به برآورد کمتر از مقدار واقعی انتقال منجر شود (Liang et al., 2003). همچنین بررسی انتقال Cd از سطح خاک تحت دو شدت بارندگی ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت نشان داد که شدت بارندگی بر تولید رواناب، رسوب و تلفات Cd اثر مستقیم داشته و Cd عمدتاً با رسوب منتقل شده است. بعبارتی پاسخ Cd به بارندگی را نمی‌توان صرفاً با تغییر غلظت آن در آب توضیح داد، بلکه تغییرات هم‌زمان رواناب، فرسایش و انتقال ذرات نیز در تعیین مقدار فلز منتقل شده نقش دارند (Huang et al., 2019). علاوه بر این، نتایج یک مطالعه مروری نشان داد که حجم رواناب و مقدار رسوب از عوامل کلیدی تعیین‌کننده مقدار انتقال با اثر مستقیم و مثبت هستند؛ اما مقدار فلز منتقل شده تنها به غلظت فلز در رواناب وابسته نیست و حجم رواناب نیز در تعیین بار انتقالی نقش مهمی دارد (Qiao et al., 2023). بنابراین، شرایط هیدرولوژیکی در تعیین سهم نسبی مسیرهای

¹ Lead

² Cadmium

محلول و ذره‌ای انتقال و غلظت برای شناخت پاسخ Cd و Pb به تغییرات شدت و مدت بارندگی موثر هستند (Zhao et al., 2025; Xian et al., 2026).

شواهد مطالعات انجام‌شده در ایران نیز اهمیت انتقال فلزات در امتداد مسیرهای جریان سطحی را نشان می‌دهد. بررسی قربانی و همکاران (۱۴۰۲) در خاک پایین‌دست محل دفن زباله در تایباد، نشان داد که غلظت هر دو فلز در بخش پایین‌دست بالا بوده و پژوهشگران احتمال انتشار آلودگی از محل دفن به اراضی پایین‌دست از طریق رواناب‌های فصلی را مطرح کردند. با این حال، انتقال مستقیم فلزات در یک رخداد بارندگی کنترل‌شده و سهم رواناب و رسوب در انتقال Pb و Cd در آن به صورت آزمایشی تفکیک نشده است. همچنین، نتایج تحقیق مقدم و همکاران (۲۰۲۵) نشان داد که ویژگی‌های رسوبات حاصل از رواناب سطحی در کانال‌های شهری تهران می‌تواند با تجمع و پراکنش فلزات سنگین ارتباط داشته باشد؛ بنابراین، جزء رسوبی رواناب می‌تواند در انتقال و توزیع آلاینده‌ها نقش مهمی داشته باشد (Moghaddam et al., 2025). این یافته در کنار نتایج (Liang et al., 2003)، (Huang et al., 2019) و (Liu et al., 2022) و (Qiao et al., 2023) نشان می‌دهد که بررسی فلزات موجود در رواناب، بدون توجه به بخش ذره‌ای، ممکن است بخشی از فرآیند واقعی انتقال آلاینده‌ها را نادیده بگیرد.

نتایج بررسی وضعیت آلودگی Cd و Pb را در خاک‌های کشاورزی دشت خرم‌آباد (Sourghali et al., 2026) و دشت نهاوند (Sharafi et al., 2026)، اهمیت منطقه‌ای و ضرورت پایش این عناصر در سامانه‌های کشاورزی و مسیرهای جابه‌جایی آن‌ها در شرایط بارندگی را برجسته می‌کند. در کنار مطالعات مستقیم انتقال فلزات، پژوهش‌های مربوط به سازوکارهای هیدرولوژیکی رواناب و فرسایشی مؤثر بر این انتقال نشان دادند که ویژگی‌های بارندگی، به‌ویژه شدت و مدت، همراه با شرایط سطح خاک (شیب، پوشش گیاهی، زبری سطح، ویژگی‌های خاک و مدیریت اراضی)، بر پاسخ هیدرولوژیکی، تولید رواناب و فرسایش اثرگذار هستند (Gómez and Nearing, 2005; Girmay et al., 2009; Moayeri, 2018; Defersha and Melesse, 2012; Soltaninia et al., 2022). بنابراین نتایج مطالعات عمومی رواناب و فرسایش به‌تنهایی برای پیش‌بینی رفتار Cd و Pb کافی نیست، زیرا قابلیت تحرک و انتقال هر فلز به ویژگی‌های شیمیایی آن و برهم‌کنش با اجزای خاک نیز وابسته است. از این رو، مقایسه کاربری‌های مختلف تحت شبیه‌سازی بارندگی به تفکیک اثر کاربری از اثر ویژگی‌های بارندگی کمک می‌کند.

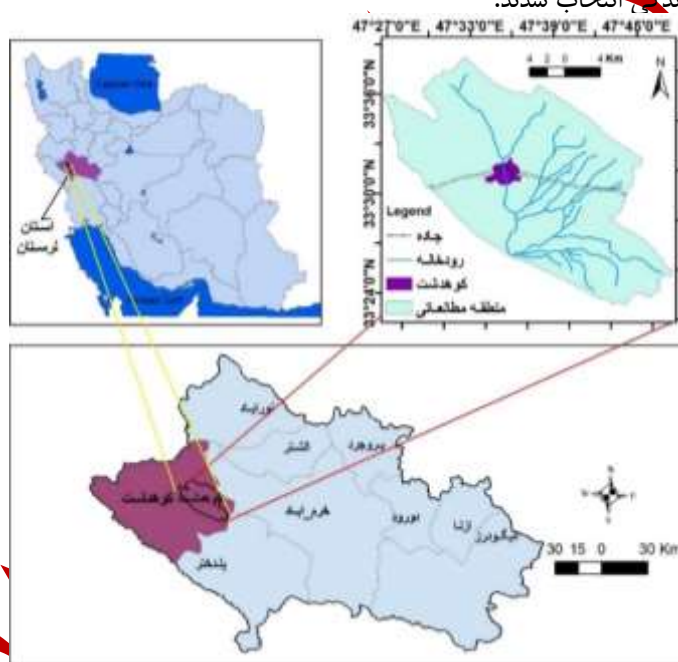
با وجود مطالعات متعدد درباره آلودگی فلزات سنگین، رواناب و فرسایش خاک، اطلاعات محدودی درباره پاسخ هم‌زمان غلظت و بار انتقالی Cd و Pb به تغییرات کاربری اراضی، شدت و مدت بارندگی وجود دارد. در نتیجه، هنوز مشخص نیست که در خاک‌های طبیعی سه کاربری متفاوت، تغییر هم‌زمان شدت و مدت بارندگی چگونه می‌تواند غلظت و بار انتقالی Cd و Pb را تغییر دهد و آیا پاسخ این دو فلز به این عوامل یکسان است. این خلأ برای حوزه آبخیز کوه‌دشت اهمیت بیشتری دارد؛ زیرا تنوع کاربری اراضی، وقوع فرایندهای رواناب و فرسایش و وجود منابع و شرایط بالقوه مؤثر بر حضور فلزات، ضرورت شناخت شرایط مستعد انتقال این عناصر به پایین‌دست را افزایش می‌دهد. از این رو، بررسی هم‌زمان رواناب، رسوب و انتقال فلزات سنگین در کاربری‌های مختلف می‌تواند درک جامع‌تری از ارتباط فرایندهای هیدرولوژیکی و فرسایشی با جابه‌جایی آلاینده‌ها فراهم کند. بنابراین، خلأ موجود تنها به کمبود مطالعات درباره Cd و Pb محدود نمی‌شود، بلکه به کمبود مطالعات فرآیندمحور درباره پاسخ هم‌زمان غلظت و بار انتقالی این دو فلز به تغییرات شدت و مدت بارندگی و کاربری اراضی مربوط است.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر کاربری اراضی، شدت و مدت بارندگی و برهم‌کنش آن‌ها بر غلظت و بار انتقالی سرب و کادمیوم از طریق رواناب در حوزه آبخیز کوه‌دشت استان لرستان انجام شد. نوآوری این پژوهش در ارزیابی هم‌زمان غلظت و بار انتقالی Cd و Pb و بررسی پاسخ این دو شاخص به اثرات متقابل کاربری اراضی و ویژگی‌های بارندگی در شرایط کنترل‌شده بارندگی مصنوعی است. تمرکز بر بار انتقالی بر واحد سطح، در کنار حجم و غلظت رواناب، امکان مقایسه مقدار واقعی‌تر خروج فلزات از سطح خاک بین کاربری‌ها و شرایط مختلف بارندگی را فراهم می‌کند. نتایج این مطالعه می‌تواند به شناسایی شرایط مستعد انتقال Cd و Pb و ارائه راهکارهای مناسب برای مدیریت رواناب و فرسایش و کاهش ورود این آلاینده‌ها به منابع آب سطحی در حوزه‌های آبخیز کمک کند.

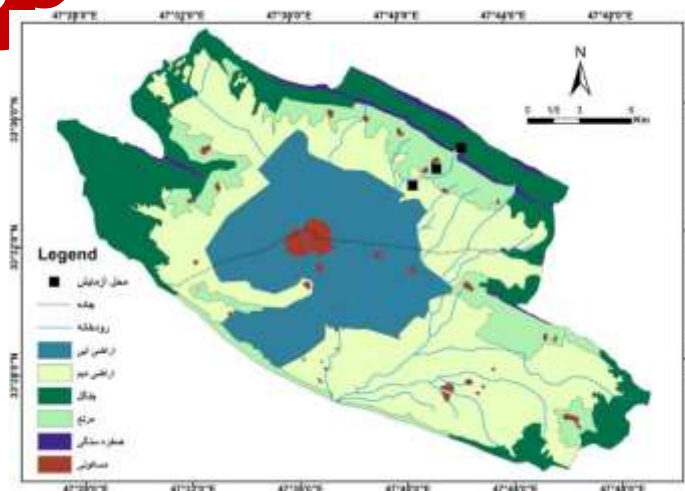
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه، طراحی آزمایش و اجرای شبیه‌سازی بارندگی

پژوهش حاضر در حوزه آبخیز کوه‌دشت، واقع در جنوب غرب استان لرستان و در محدوده زیر حوزه رودخانه کشکان، انجام شد. این حوزه بین طول‌های جغرافیایی $27^{\circ} 47'$ تا $45^{\circ} 47'$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $34^{\circ} 24'$ تا $33^{\circ} 36'$ شمالی قرار دارد (شکل ۱) و مساحتی حدود ۴۵۶۰۰ هکتار را دربر می‌گیرد. ارتفاع منطقه از حدود ۱۱۴۰ تا ۱۹۳۶ متر از سطح دریا متغیر است. اقلیم منطقه عمدتاً مدیترانه‌ای بوده و دارای زمستان‌های نسبتاً سرد و مرطوب و تابستان‌های گرم است. میانگین بارندگی سالانه منطقه حدود ۴۵۰ میلی‌متر گزارش شده و بخش عمده بارش سالانه در ماه‌های سرد سال رخ می‌دهد. کاربری‌های اصلی شامل اراضی کشاورزی و باغی حدود ۶۳/۷ درصد، اراضی جنگلی حدود ۲۱/۱۶ درصد و مراتع حدود ۱۲/۵ درصد از مساحت حوزه را تشکیل می‌دهند (شکل ۲). با توجه به تفاوت این کاربری‌ها از نظر پوشش گیاهی، شرایط سطح خاک و مقدار حفاظت در برابر فرسایش، سه کاربری کشاورزی، مرتع و جنگل برای آزمایش‌های شبیه‌سازی بارندگی انتخاب شدند.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در ایران و استان لرستان



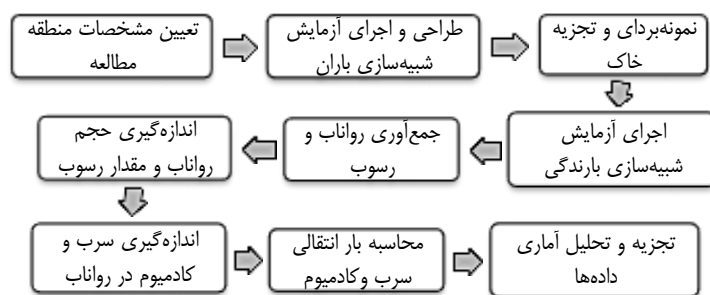
شکل ۲: نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه و موقعیت محل‌های اجرای آزمایش در سه کاربری

به منظور بررسی اثر هم‌زمان کاربری اراضی، شدت و مدت بارندگی بر تولید رواناب، رسوب و انتقال سرب و کادمیوم، آزمایش‌ها در سه کاربری کشاورزی، مرتع و جنگل و به صورت فاکتوریل سه‌عاملی انجام شد. عوامل مورد بررسی شامل کاربری اراضی در سه سطح، شدت بارندگی در سه سطح (۵۰، ۷۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت) و مدت بارندگی در سه سطح (۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه) بود. هر ترکیب تیماری در سه تکرار اجرا شد و در مجموع ۸۱ آزمایش انجام گرفت. براساس داده‌های به‌دست‌آمده از ایستگاه هواشناسی خرم‌آباد، حداکثر شدت بارندگی متناظر با دوره بازگشت ۱۰ ساله، ۷۰ میلی‌متر بر ساعت محاسبه شد و یک دامنه پایین‌تر و بالاتر پیرامون این شدت، به ترتیب ۵۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت، به عنوان تیمارهای شدت بارندگی انتخاب شدند که با تحقیقات دیگر همخوانی دارد (بیات و همکاران، ۱۴۰۰؛ علی رمایی و همکاران ۱۳۹۷). مدت‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه نیز با توجه به نقش مدت بارندگی در پاسخ رواناب و فرسایش و با استناد به مطالعات شبیه‌سازی باران انتخاب شدند (Khaledi Darvishan et al., 2016).

آزمایش‌ها با استفاده از شبیه‌ساز باران قابل حمل نوع کامفورست^۳ ساخت پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری انجام شد (شکل ۳) که بر اساس نمونه استاندارد دانشگاه واخنینگن هلند طراحی شده است (کاویان و همکاران، ۱۳۹۲؛ بیات و همکاران، ۱۴۰۰). پیش از اجرای آزمایش‌ها، شبیه‌ساز برای دستیابی به شدت‌های مورد نظر تنظیم و کنترل شد. پس از اعمال بارندگی با شدت و مدت مشخص، رواناب خروجی از هر پلات به‌طور کامل در ظروف جمع‌آوری و حجم آن اندازه‌گیری شد. نمونه‌های رواناب برای تعیین غلظت Pb و Cd و رسوب حاصل از هر پلات پس از جمع‌آوری و اندازه‌گیری، برای بررسی انتقال این عناصر مورد استفاده قرار گرفتند. در این پژوهش هیچ‌گونه Pb یا Cd به پلات‌های آزمایشی اضافه نشد و آزمایش‌ها در شرایط طبیعی خاک و پوشش سطحی کاربری‌های مورد مطالعه انجام گرفت؛ بنابراین، عناصر موجود در رواناب و رسوب ناشی از مقدار موجود آن‌ها در خاک و فرایندهای انتقال در شرایط بارندگی بودند. روند کلی اجرای پژوهش نیز در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۳: دستگاه شبیه‌ساز باران نوع کامفورست (ابعاد ۲۵×۲۵ سانتی‌متری)



شکل ۴. روندنمای مراحل اجرای پژوهش

نمونه برداری خاک

به منظور تعیین ویژگی های اولیه خاک و مقادیر فلزات مورد مطالعه، نمونه های خاک از عمق ۲۰-۰ سانتی متر در محل های منتخب هر یک از کاربری های کشاورزی، مرتعی و جنگلی و بر اساس نمایندگی از شرایط غالب هر کاربری و با هدف انتخاب نقاط نسبتاً همگن از نظر شرایط سطح خاک و پوشش سطحی برداشت شدند. سپس نمونه های برداشت شده پس از انتقال به آزمایشگاه برای تعیین ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک و مقادیر فلزات مورد مطالعه آماده سازی و تجزیه شدند. ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986)، جرم مخصوص ظاهری با روش رینگ (Blake and Hartg, 1986)، pH، هدایت الکتریکی به ترتیب با pH متر Bante مدل PHS-3BW و هدایت سنج الکتریکی Hanna مدل HI2300 (Thomas, 1996) و ماده آلی به روش اکسیداسیون تر والکلی-بلک^۴ (Walkley & Black, 1934) اندازه گیری شدند. Pb و Cd قابل استخراج با استفاده از محلول دی اتیلن تری آمین پنتا استیک اسید^۵ DTPA استخراج شدند. عصاره حاصل پس از صاف سازی برای تعیین غلظت Pb و Cd با استفاده از دستگاه طیف سنج جذب اتمی (AAS Analyst 400, PerkinElmer) مورد اندازه گیری قرار گرفت (Lindsay and Norvell, 1978) (جدول ۱).

جدول ۱. ویژگی های فیزیکی و شیمیایی اولیه خاک در کاربری های مورد مطالعه

کاربری اراضی	EC (dS m ⁻¹)	pH	ماده آلی (%)	سرب قابل جذب (mg kg ⁻¹)	کادمیوم قابل جذب (mg kg ⁻¹)	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)
کشاورزی	۰/۴۶۵	۷/۶۴	۰/۸۶	۱	۰/۴۸	۳۰	۴۸	۲۲
مرتع	۰/۸۲۰	۷/۸۱	۱/۶۶	۱/۳	۰/۵۲	۴۶	۳۴	۲۰
جنگل	۰/۵۸۷	۷/۵۵	۲/۳۸	۱/۴۲	۰/۸۶	۳۰	۴۰	۲۰

اندازه گیری رواناب و رسوب

در طول هر آزمایش، رواناب خروجی از پلات در محل جمع آوری واقع در پایین دست پلات جمع آوری شد. زمان آغاز رواناب، از شروع بارندگی تا مشاهده نخستین جریان خروجی از پلات، اندازه گیری و ثبت شد. پس از پایان بارندگی، حجم کل رواناب با استفاده از استوانه مدرج (مزور) اندازه گیری و بر حسب میلی لیتر ثبت شد. اندازه گیری و ثبت رواناب در آزمایش های شبیه سازی بارندگی نیز در مطالعات پیشین مورد استفاده قرار گرفته است (Marques et al., 2007). برای اندازه گیری رسوب، نمونه رواناب از کاغذ صافی واتمن شماره ۴۰ عبور داده شد تا ذرات رسوبی موجود در آن به طور کامل روی کاغذ صافی جمع آوری شوند. پس از فیلتراسیون، کاغذ صافی حاوی رسوب در آون با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفت تا رطوبت آن کاملاً خارج شود. پس از خروج از آون و سرد شدن،

^۴ Walkley-Black

^۵ Diethylenetriaminepentaacetic acid (DTPA)

^۶ Atomic Absorption Spectrometer (AAS)

کاغذ صافی حاوی رسوب مجدداً با استفاده از ترازوی آزمایشگاهی دقیق با دقت یک‌صدم گرم توزین و وزن خشک رسوب از اختلاف وزن کاغذ صافی حاوی رسوب و وزن اولیه کاغذ صافی به‌دست آمد (International Organization for Standardization (ISO), 2005). در نهایت، مقدار رسوب بر اساس وزن خشک رسوب و مساحت پلات محاسبه و بر حسب گرم بر متر مربع (g m^{-2}) بیان شد (رابطه ۱).

$$S = \frac{W_s}{A} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن S مقدار رسوب (g m^{-2})، W_s وزن خشک رسوب (g) و A مساحت پلات (m^2) است.

اندازه‌گیری غلظت سرب و کادمیوم در رواناب

نمونه‌های رواناب پس از انتقال به آزمایشگاه به‌خوبی همگن شدند و سپس برای جداسازی ذرات معلق از کاغذ صافی عبور داده شدند. در محلول صاف‌شده حاصل از فیلتراسیون غلظت Pb و Cd با استفاده از دستگاه جذب اتمی شعله‌ای (Flame AAS; AAnalyst 400, PerkinElmer) اندازه‌گیری شد. در این مرحله، هضم اسیدی یا استخراج جداگانه‌ای انجام نشد و قرائت دستگاه بر روی نمونه صاف‌شده انجام گرفت. غلظت Pb و Cd بر اساس کالیبراسیون دستگاه با محلول‌های استاندارد و بر حسب میلی‌گرم بر لیتر (mg L^{-1}) گزارش شد (American Public Health Association et al., 2012).

محاسبه بار انتقال یافته سرب و کادمیوم

به‌منظور تعیین مقدار انتقال Pb و Cd از سطح خاک، بار انتقالی هر فلز بر اساس غلظت فلز در رواناب و حجم رواناب محاسبه شد (Galdos et al., 2009). بار انتقالی فلز برای هر آزمایش از رابطه زیر به‌دست آمد:

$$L = C \times V \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن L جرم فلز منتقل شده از پلات (mg)، C غلظت فلز در رواناب (mg L^{-1}) و V حجم رواناب (L) است. با توجه به مساحت پلات آزمایشی (0.625 m^2)، بار انتقالی Pb و Cd بر واحد سطح از رابطه زیر محاسبه شد:

$$L_A = \frac{C \times V}{A} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن L_A بار انتقالی فلز بر واحد سطح (mg m^{-2})، C غلظت فلز در رواناب (mg L^{-1})، V حجم رواناب (L) و A مساحت پلات آزمایشی (m^2) است. در این پژوهش، بار انتقالی Pb و Cd مورد استفاده در تحلیل‌های آماری، بر حسب میلی‌گرم بر مترمربع (mg m^{-2}) بیان شدند.

تجزیه و تحلیل آماری

داده‌های حاصل از آزمایش‌ها پس از ورود به محیط نرم‌افزار Excel، با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 تجزیه و تحلیل شدند. اثرات اصلی کاربری اراضی، شدت بارندگی و مدت بارندگی و همچنین برهم‌کنش‌های دوتایی و سه‌تایی آنها بر حجم رواناب، مقدار رسوب، غلظت و بار انتقالی Pb و Cd بررسی شد. تکرار نیز در تحلیل آماری به‌عنوان اثر آزمایشی در نظر گرفته شد. معناداری اثرات در سطح احتمال ۵ درصد ($P < 0.05$) ارزیابی و در صورت معنی‌داری، مقایسه میانگین‌ها با آزمون Tukey در سطح احتمال ۵ درصد انجام گرفت. همچنین، به‌منظور بررسی ارتباط بین بار انتقالی Pb و Cd با حجم رواناب و مقدار رسوب، ضریب همبستگی پیرسون محاسبه شد (SAS Institute Inc., 2013).

یافته‌های پژوهش

غلظت سرب و کادمیوم در رواناب

غلظت Pb و Cd در رواناب به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر عوامل مورد بررسی قرار گرفت، اگرچه الگوی پاسخ دو فلز متفاوت بود (جدول ۲). برای Pb، مدل آماری معنی‌دار بود ($P < 0.001$) و ۸۷/۷ درصد تغییرات را توضیح داد ($R^2 = 0.877$). اثر اصلی کاربری اراضی، شدت و مدت بارندگی معنی‌دار بود. میانگین غلظت Pb در کاربری جنگل (0.633 mg L^{-1}) به‌طور معنی‌داری بیشتر از مرتع (0.275) و کشاورزی (0.140 mg L^{-1}) بود. با افزایش شدت بارندگی از ۵۰ به ۹۰ mm h^{-1} ، غلظت Pb از ۰/۱۷۰ به ۰/۴۵۹ mg L^{-1} افزایش یافت.

و بیشترین و کمترین مقدار آن به ترتیب در مدت‌های ۱۵ (۰/۴۲۸) و ۵ دقیقه (۰/۲۶۹ mg L⁻¹) مشاهده شد. برهم‌کنش کاربری × شدت و برهم‌کنش سه‌گانه کاربری × شدت × مدت معنی‌دار بود، درحالی‌که برهم‌کنش کاربری × مدت و شدت × مدت معنی‌دار نبود. برای Cd نیز مدل آماری بسیار معنی‌دار بود (P < ۰/۰۰۰۱) و ۹۲/۲ درصد تغییرات غلظت را تبیین کرد (R² = ۰/۹۹۲). اثر کاربری اراضی، شدت و مدت بارندگی بر غلظت Cd معنی‌دار بود و برهم‌کنش‌های کاربری اراضی × شدت بارندگی و شدت × مدت بارندگی نیز معنی‌دار بودند، در حالی‌که برهم‌کنش کاربری × مدت و برهم‌کنش سه‌گانه معنی‌دار نبودند (P > ۰/۰۵). میانگین، غلظت Cd در کاربری جنگل (۱/۲۴۷ mg L⁻¹) به‌طور معنی‌داری بیشتر از کشاورزی (۰/۳۸۲) و مرتع (۰/۳۵۹) بود؛ اما بین دو کاربری کشاورزی و مرتع تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. با افزایش شدت بارندگی از ۵۰ به ۹۰ mm h⁻¹، غلظت Cd از ۰/۲۳۳ به ۰/۷۱۳ و ۱/۰۴۳ mg L⁻¹ افزایش یافت و هر سه سطح شدت با یکدیگر تفاوت معنی‌دار داشتند. غلظت Cd از ۰/۵۱۵ در ۵ دقیقه به ۰/۸۴۲ mg L⁻¹ در ۱۵ دقیقه افزایش یافت؛ تفاوت بین ۵ و ۱۰ دقیقه معنی‌دار نبود، در حالی‌که ۱۵ دقیقه با هر دو مدت تفاوت معنی‌دار داشت. در مجموع، هر دو فلز در کاربری جنگل غلظت بیشتری داشتند، اما الگوی برهم‌کنش‌ها متفاوت بود؛ به‌طوری‌که غلظت Pb تحت تأثیر برهم‌کنش سه‌گانه کاربری × شدت × مدت قرار گرفت، درحالی‌که برای Cd، برهم‌کنش‌های کاربری × شدت و شدت × مدت معنی‌دار و برهم‌کنش سه‌گانه غیرمعنی‌دار بود. این تفاوت احتمالاً به تفاوت در ویژگی‌های شیمیایی، تحرک و رفتار Cd و Pb در پاسخ به شرایط هیدرولوژیکی و فزایشی مربوط است (Alloway, 2013).

جدول ۲. اثر کاربری اراضی، شدت و مدت بارندگی بر غلظت سرب (Pb) و کادمیوم (Cd) در رواناب

عامل مورد بررسی	سطح	Pb (mg L ⁻¹)	Cd (mg L ⁻¹)
کاربری اراضی	کشاورزی	۰/۱۴۰c	۰/۳۸۲a
	مرتع	۰/۲۷۵b	۰/۳۵۹a
	جنگل	۰/۶۳۳a	۱/۲۴۷b
شدت بارندگی (میلی‌متر بر ساعت)	۵۰	۰/۱۷۰b	۰/۲۳۳c
	۷۰	۰/۴۱۹a	۰/۷۱۳b
	۹۰	۰/۳۵۹a	۱/۰۴۳a
مدت بارندگی (دقیقه)	۵	۰/۲۶۹b	۰/۵۱۵b
	۱۰	۰/۳۵۱ab	۰/۶۳۱b
	۱۵	۰/۴۲۸a	۰/۸۴۲a
کاربری × شدت	---	*	***
کاربری × مدت	---	ns	ns
شدت × مدت	---	ns	*
کاربری × شدت × مدت	---	***	ns
R ²	---	۰/۸۷۷	۰/۹۲۲

مقادیر دارای حروف متفاوت در هر عامل، بر اساس آزمون Tukey در سطح احتمال ۵ درصد، اختلاف معنی‌دار دارند ns* و *** به ترتیب نشان‌دهنده عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطوح ۰/۰۵ و ۰/۰۰۱ هستند.

بار انتقالی سرب و کادمیوم

به‌منظور تعیین مقدار واقعی فلزات خارج‌شده از سطح خاک، بار انتقالی Pb و Cd بر اساس غلظت هر فلز در رواناب و حجم رواناب محاسبه و بر حسب میلی‌گرم بر مترمربع (mg m⁻²) بیان شد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بار انتقالی هر دو فلز تحت تأثیر معنی‌دار عوامل مورد بررسی قرار گرفت، اگرچه شدت و الگوی پاسخ Pb و Cd متفاوت بود (جدول ۳). برای Pb، مدل آماری معنی‌دار بود و ۸۲/۴ درصد از تغییرات بار Pb را توضیح داد (R² = ۰/۸۲۴). کاربری اراضی، شدت و مدت بارندگی اثر معنی‌داری داشتند و بیشترین اثر مربوط به کاربری اراضی (F = ۵۵/۳۲)، سپس شدت بارندگی (F = ۳۰/۶۵) و مدت بارندگی

($F=6/82$) بود. برهم کنش کاربری اراضی $\times$ شدت بارندگی معنی‌دار بود ($F=6/73$)، اما سایر برهم کنش‌ها معنی‌دار نبودند ($P>0/05$). میانگین بار انتقالی Pb در کاربری‌های کشاورزی، مرتع و جنگل به ترتیب ۰/۳۷۸، ۱/۱۴۱ و $2/786 \text{ mg m}^{-2}$ بود و هر سه کاربری با یکدیگر تفاوت معنی‌داری داشتند. با افزایش شدت بارندگی، بار Pb از $0/413 \text{ mg m}^{-2}$ در شدت 50 mm h^{-1} به ترتیب به $1/711 \text{ mg m}^{-2}$ در شدت‌های ۷۰ و $2/181 \text{ mg m}^{-2}$ در شدت‌های ۹۰ افزایش یافت؛ شدت 50 mm h^{-1} با دو شدت بالاتر تفاوت معنی‌داری داشت، اما بین شدت‌های ۷۰ و 90 mm h^{-1} تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. همچنین بار Pb از $0/967 \text{ mg m}^{-2}$ در ۵ دقیقه به $1/520 \text{ mg m}^{-2}$ و $1/818$ در ۱۰ و ۱۵ دقیقه افزایش یافت، ولی تنها تفاوت بین مدت‌های ۵ و ۱۵ دقیقه معنی‌دار بود.

برای Cd مدل آماری معنی‌دار بود و $87/6$ درصد تغییرات بار انتقالی را توضیح داد ($R^2=0/876$). هر سه عامل اصلی اثر معنی‌داری داشتند و بیشترین اثر مربوط به کاربری اراضی ($F=75/16$)، سپس شدت ($F=59/68$) و مدت بارندگی ($F=9/74$) بود. برهم کنش کاربری اراضی $\times$ شدت بارندگی نیز معنی‌دار بود ($F=14/33$)، در حالی که سایر برهم کنش‌ها معنی‌دار نبودند ($P>0/05$). میانگین بار Cd در کاربری‌های کشاورزی، مرتع و جنگل به ترتیب $1/04$ ، $1/54$ و $5/60 \text{ mg m}^{-2}$ بود؛ بار انتقالی در جنگل به طور معنی‌داری بیشتر از دو کاربری دیگر بود، اما بین کشاورزی و مرتع تفاوتی مشاهده نشد. این تفاوت احتمالاً با ویژگی‌های خاک و شرایط سطحی و در نتیجه تفاوت در تحرک و قابلیت انتقال Cd مرتبط است، هرچند، به‌تنهایی نشان‌دهنده بیشتر بودن مقدار کل Cd در خاک جنگل نیست. با افزایش شدت بارندگی بار Cd از $0/56$ در شدت ۵۰ به $2/62$ و 5 mg m^{-2} به ترتیب در شدت‌های ۷۰ و 90 mm h^{-1} افزایش یافت و هر سه شدت با یکدیگر تفاوت معنی‌دار داشتند. همچنین، بار Cd از $1/84$ در ۵ دقیقه به $2/70$ و $3/64 \text{ mg m}^{-2}$ در ۱۰ و ۱۵ دقیقه افزایش یافت؛ تفاوت بین مدت‌های ۵ و ۱۰ و نیز ۱۰ و ۱۵ دقیقه معنی‌دار نبود، در حالی که مدت ۵ و ۱۵ دقیقه تفاوت معنی‌داری داشتند.

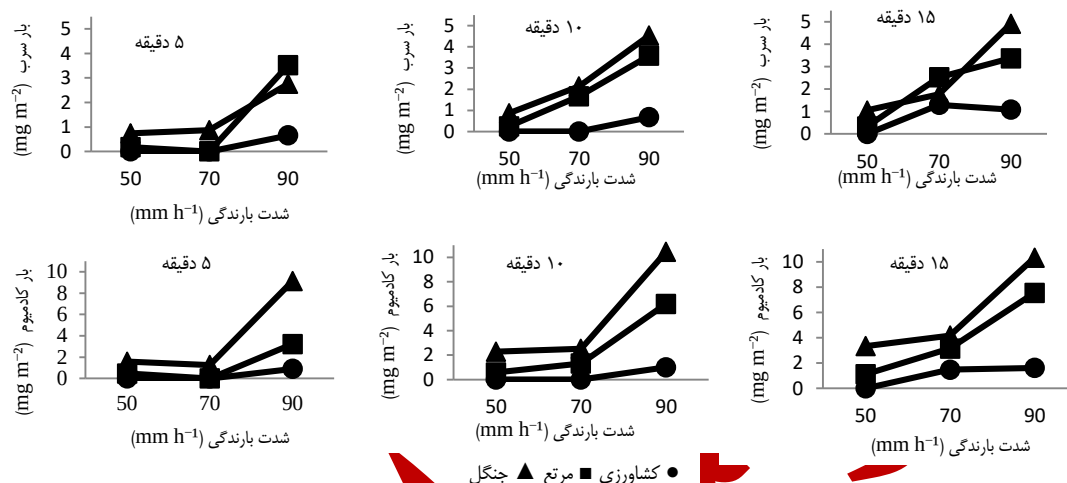
در مجموع، هر دو فلز در کاربری جنگلی و تحت شدت‌های بالاتر بارندگی بار انتقالی بیشتری داشتند. افزایش بار Cd در پاسخ به شدت بارندگی، به‌ویژه در کاربری جنگلی، بیشتر از Pb بود. در هر دو فلز، برهم کنش کاربری $\times$ شدت معنی‌دار، اما برهم کنش سه‌گانه معنی‌دار نبود. اندازه‌گیری Pb و Cd قابل استخراج در خاک نیز حضور هر دو عنصر را در هر سه کاربری نشان داد؛ بنابراین، انتقال مشاهده‌شده در شرایط بارندگی مصنوعی ناشی از حضور اولیه این عناصر در خاک و جابه‌جایی آن‌ها از طریق رواناب و فرسایش بوده است. تفاوت الگوی انتقال دو فلز نیز احتمالاً به تفاوت در تحرک و رفتار شیمیایی آن‌ها در شرایط مختلف رواناب و فرسایش مربوط است (Selahvarzi et al., 2024).

جدول ۳. اثر کاربری اراضی، شدت و مدت بارندگی بر بار انتقالی سرب (Pb) و کادمیوم (Cd) در رواناب

عامل مورد بررسی	سطح	Pb load (mg m^{-2})	Cd load (mg m^{-2})
کاربری اراضی	کشاورزی	۰/۳۷۸c	۱/۰۴b
	مرتع	۱/۱۴۱b	۱/۵۴b
	جنگل	۲/۷۸۶a	۵/۶۰a
شدت بارندگی (میلی‌متر بر ساعت)	۵۰	۰/۴۱۳b	۰/۵۶c
	۷۰	۱/۷۱۱a	۲/۶۲b
	۹۰	۲/۱۸۱a	۵a
مدت بارندگی (دقیقه)	۵	۰/۹۶۷b	۱/۸۴b
	۱۰	۱/۵۲۰ab	۲/۷۰ab
	۱۵	۱/۸۱۸a	۳/۶۴a
کاربری $\times$ شدت	---	***	***
کاربری $\times$ مدت	---	ns	ns
شدت $\times$ مدت	---	ns	ns
کاربری $\times$ شدت $\times$ مدت	---	ns	ns
R^2	---	۰/۸۲۴	۰/۸۷۶

مقادیر با حروف متفاوت، بر اساس آزمون Tukey در سطح احتمال ۵ درصد، اختلاف معنی‌دار دارند ns و *** به ترتیب نشان‌دهنده عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح ۰/۰۰۱ هستند.

در مجموع، هر دو فلز در کاربری جنگلی و تحت شدت‌ها و مدت‌های بیشتر بارندگی، بار انتقالی بالاتری نشان دادند. الگوی تغییرات بار انتقالی Pb و Cd در پاسخ به افزایش شدت و مدت بارندگی نیز به صورت نموداری در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۵. تغییرات بار انتقالی سرب (Pb) و کادمیوم (Cd) در پاسخ به شدت و مدت بارندگی در کاربری‌های مختلف

ارتباط غلظت و بار انتقالی Pb سرب و کادمیوم با ویژگی‌های رواناب و رسوب

به منظور بررسی ارتباط بین ویژگی‌های رواناب و فرسایش خاک با غلظت و بار انتقالی فلزات، ضرایب همبستگی پیرسون محاسبه شد (جدول ۴). غلظت و بار انتقالی Pb و Cd با حجم رواناب و مقدار رسوب همبستگی مثبت و معنی‌داری داشتند. ضرایب همبستگی غلظت Pb با رواناب و رسوب به ترتیب ۰/۵۸۶ و ۰/۵۹۹ و برای Cd به ترتیب ۰/۵۲۵ و ۰/۶۲۶ بود. بار انتقالی Pb با حجم رواناب و رسوب به ترتیب ۰/۷۷۰ و ۰/۶۴۴ و بار انتقالی Cd با این دو متغیر به ترتیب ۰/۷۴۰ و ۰/۶۷۵ همبستگی داشت ($P < 0.001$). همچنین، حجم رواناب و مقدار رسوب ($r=0.820$) و بار انتقالی Pb و Cd ($r=0.886$) همبستگی مثبت و معنی‌داری نشان دادند. در هر دو فلز، ارتباط حجم رواناب با بار انتقالی قوی‌تر از ارتباط آن با غلظت بود. با توجه به دخالت حجم رواناب در محاسبه بار انتقالی، این رابطه باید با ماهیت محاسباتی بار انتقالی تفسیر شود. در مجموع، نتایج نشان داد که غلظت به تنهایی بیانگر مقدار خروج Cd و Pb از سطح خاک نیست و برای ارزیابی جامع‌تر انتقال این عناصر، توجه هم‌زمان به حجم رواناب، بار انتقالی و مقدار رسوب ضروری است.

جدول ۴. ماتریس ضرایب همبستگی پیرسون بین غلظت و بار انتقالی سرب و کادمیوم، حجم رواناب و مقدار رسوب

متغیر	غلظت سرب	غلظت کادمیوم	بار سرب	بار کادمیوم	حجم رواناب	مقدار رسوب
غلظت سرب (mg L ⁻¹)	۱					
غلظت کادمیوم (mg L ⁻¹)	۰/۸۲۸***	۱				
بار سرب (mg m ⁻²)	۰/۸۶۴***	۰/۷۲۷***	۱			
بار کادمیوم (mg m ⁻²)	۰/۷۲۹***	۰/۸۵۹***	۰/۸۸۶***	۱		
حجم رواناب (mL)	۰/۵۸۶***	۰/۵۳۵***	۰/۷۷۰***	۰/۷۴۰***	۱	
مقدار رسوب (g m ⁻²)	۰/۵۹۹***	۰/۶۲۶***	۰/۶۴۴***	۰/۶۷۵***	۰/۸۲۰***	۱

*** $P < 0.001$ ضرایب بر اساس ۸۱ مشاهده محاسبه شده‌اند. خانه‌های خالی به دلیل تقارن ماتریس حذف شده‌اند.

مقایسه و جمع‌بندی الگوی انتقال سرب و کادمیوم

نتایج نشان داد که کاربری اراضی، شدت و مدت بارندگی بر غلظت و بار انتقالی Pb و Cd در رواناب اثرگذار بودند، اگرچه الگوی پاسخ دو فلز در برخی برهم‌کنش‌ها متفاوت بود. در هر دو فلز، بیشترین غلظت و بار انتقالی در کاربری جنگلی مشاهده شد و با افزایش شدت بارندگی، هر دو متغیر افزایش یافتند. برای Pb، برهم‌کنش سه‌گانه کاربری اراضی $\times$ شدت $\times$ مدت بارندگی در غلظت معنی‌دار بود، در حالی که در بار انتقالی معنی‌دار نبود. در Cd نیز برهم‌کنش کاربری اراضی $\times$ شدت بارندگی بر غلظت و بار انتقالی معنی‌دار بود، اما برهم‌کنش سه‌گانه معنی‌دار نشد.

بار انتقالی Pb با حجم رواناب و مقدار رسوب به‌ترتیب همبستگی مثبت و معنی‌داری برابر با ۰/۷۷۰ و ۰/۶۴۴ و برای Cd برابر با ۰/۷۴۰ و ۰/۶۷۵ داشت ($P < 0.001$). به‌طوری‌که در هر دو فلز، این همبستگی با حجم رواناب قوی‌تر بود. با افزایش شدت بارندگی از ۵۰ به ۹۰ میلی‌متر بر ساعت، غلظت Pb و Cd به‌ترتیب حدود ۱۷۰ و ۳۴۸ درصد و بار انتقالی آن‌ها حدود ۴۲۸ و ۳۴۸ درصد افزایش یافت. بنابراین، افزایش شدت بارندگی نه‌تنها غلظت Pb و Cd در رواناب، بلکه بار انتقالی آن‌ها از سطح خاک را نیز افزایش داد و در Pb، افزایش بار انتقالی به‌مراتب بیشتر از افزایش غلظت بود.

بحث

نقش شدت و مدت بارندگی در تولید رواناب و رسوب

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که افزایش شدت و مدت بارندگی با افزایش تولید رواناب و رسوب همراه بود و شدت بارندگی در مقایسه با مدت بارندگی تأثیر بیشتری بر این دو مؤلفه داشت. افزایش شدت بارندگی با افزایش انرژی واردشده به سطح خاک و افزایش جریان سطحی، شرایط لازم برای جداشدگی و انتقال ذرات خاک را تقویت می‌کند. همچنین، هنگامی که شدت بارندگی از ظرفیت نفوذ خاک فراتر رود، سهم بیشتری از آب بارندگی به رواناب تبدیل می‌شود و در نتیجه، حجم آب درگیر در انتقال مواد از سطح خاک افزایش می‌یابد. این سازوکار می‌تواند افزایش رواناب و رسوب مشاهده‌شده در مطالعه حاضر و در پی آن، افزایش انتقال Pb و Cd در شرایط بارندگی با شدت بیشتر را توضیح دهد. این یافته‌ها با نتایج برخی مطالعات انجام‌شده درباره پاسخ رواناب و فرسایش خاک به افزایش شدت بارندگی همخوانی دارد؛ به‌طوری‌که بیات و همکاران، ۱۴۰۰ پرهیت و همکاران (۱۳۹۳)، خالدی درویشان و همکاران (۱۳۹۳) و همچنین، واعظی و عبادی (۱۳۹۶) اثرات شدت و مدت بارندگی در تولید رواناب و هدررفت خاک را مؤثر دانستند. هوانگ و همکاران (۲۰۱۹) نیز در شرایط بارندگی شبیه‌سازی‌شده، افزایش شدت بارندگی را با افزایش رواناب، تولید رسوب و تلفات Cd مرتبط دانستند (Huang et al., 2019). افزایش مدت بارندگی نیز با افزایش رواناب و رسوب همراه بود که می‌تواند ناشی از تداوم جریان سطحی و افزایش حجم تجمعی آب در طول رخداد بارندگی باشد. اهمیت این فرآیندها برای انتقال فلزات سنگین از آنجا ناشی می‌شود که رواناب و رسوب، دو مسیر اصلی انتقال جانبی مواد از سطح خاک را فراهم می‌کنند. افزایش رواناب می‌تواند مقدار آب حامل فلزات محلول و ذرات معلق را افزایش دهد، در حالی که افزایش جداشدگی و انتقال ذرات خاک می‌تواند موجب جابه‌جایی فلزات متصل به فاز جامد شود (Qiao et al., 2023). یافته‌های مطالعه حاضر نیز با این چارچوب سازگار بود؛ به‌طوری‌که افزایش شدت و مدت بارندگی عموماً با افزایش غلظت و بار انتقالی Pb و Cd همراه شد. بنابراین، تغییرات ایجادشده در رواناب و رسوب در اثر شرایط بارندگی را می‌توان بر انتقال Pb و Cd از سطح خاک در رخدادهای بارندگی مؤثر دانست.

ارتباط رواناب و رسوب با انتقال سرب و کادمیوم

یکی از یافته‌های مهم مطالعه حاضر، افزایش بار انتقالی Pb و Cd همراه با افزایش شدت و مدت بارندگی بود. این نتیجه نشان می‌دهد که انتقال فلزات را نمی‌توان مستقل از فرآیندهای هیدرولوژیکی و فرسایشی سطح خاک تفسیر کرد. در واقع، مقدار رسوب یکی از عوامل تعیین‌کننده مقدار انتقال فلزات غیرمحلول محسوب می‌شود، زیرا بخشی از فلزات سنگین از طریق جذب بر ذرات خاک و انتقال آن‌ها با رسوب جابه‌جا می‌شوند (Qiao et al., 2023). در مطالعه حاضر، بار Pb با حجم رواناب ($r=0.770$) و مقدار رسوب ($r=0.644$) و بار Cd با حجم رواناب ($r=0.740$) و مقدار رسوب ($r=0.675$) همبستگی مثبت و معنی‌داری داشتند ($P<0.001$). بنابراین، افزایش حجم رواناب و

مقدار رسوب با افزایش بار انتقالی هر دو فلز همراه و نشان می‌دهد که فرآیندهای هیدرولوژیکی و فرسایشی، در کنار غلظت فلز در رواناب، در تعیین مقدار Cd و Pb خارج شده از سطح خاک اهمیت دارند (Xian et al., 2026). این یافته‌ها اهمیت در نظر گرفتن هم‌زمان فرآیندهای هیدرولوژیکی و فرسایشی را در ارزیابی انتقال فلزات سنگین نشان می‌دهد.

در مطالعه حاضر غلظت Cd و Pb در بخش رسوب جداگانه اندازه‌گیری نشد و فقط اندازه‌گیری این عناصر در نمونه‌های رواناب انجام گرفت. بنابراین، نتایج حاضر امکان تعیین دقیق سهم نسبی مسیرهای محلول و ذره‌ای در انتقال Cd و Pb را فراهم نمی‌کند. با وجود این، ارتباط معنی‌دار بین بار انتقالی فلزات و مقدار رواناب و رسوب نشان می‌دهد که افزایش شدت بارندگی، از طریق افزایش رواناب و جابه‌جایی بیشتر ذرات خاک، می‌تواند با افزایش انتقال این عناصر همراه باشد. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که استفاده از بار انتقالی در کنار غلظت، ارزیابی واقع‌بینانه‌تری از مقدار خروج Cd و Pb از سطح خاک در یک رخداد بارندگی فراهم می‌کند.

اثر کاربری اراضی بر انتقال سرب و کادمیوم

کاربری اراضی اثر معنی‌داری بر غلظت و بار انتقالی Cd و Pb داشت. بیشترین غلظت و بار انتقالی هر دو فلز در کاربری جنگلی مشاهده شد؛ به‌طوری‌که غلظت Cd و Pb در رواناب به‌ترتیب 0.633 mg L^{-1} و 1.247 mg L^{-1} و بار انتقالی آن‌ها 2.786 و 5.60 mg m^{-2} بود. کمترین مقادیر عمدتاً در کاربری کشاورزی مشاهده شد که می‌تواند با تفاوت در ویژگی‌های خاک و پاسخ هیدرولوژیکی کاربری‌ها مرتبط باشد. مقایسه ویژگی‌های اولیه خاک نشان داد که کاربری جنگلی بیشترین مقدار Cd و Pb قابل استخراج با DTPA را داشت؛ به‌طوری‌که مقادیر Cd و Pb قابل استخراج در جنگل به‌ترتیب 1.42 mg kg^{-1} و 0.86 mg kg^{-1} بود، در حالی‌که این مقادیر در کشاورزی به‌ترتیب 0.48 و 1.30 در مرتع 1.52 mg kg^{-1} بودند. این وضعیت می‌تواند تا حدی با تفاوت مشاهده‌شده در غلظت و بار انتقالی فلزات، به‌ویژه Pb، مرتبط باشد. در مورد Cd، تفاوت مشاهده‌شده بین کاربری‌ها را می‌توان با توجه به نقش ویژگی‌های خاک و شرایط محیطی مؤثر بر تحرک و قابلیت انتقال این عنصر تفسیر کرد. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که حلالیت و تحرک Cd به عواملی مانند pH، ماده آلی، بافت و ظرفیت نگهداشت خاک وابسته است و در برخی شرایط، غلظت Cd در محلول خاک جنگلی می‌تواند بیشتر از خاک‌های زراعی باشد، حتی زمانی که مقدار کل Cd در خاک جنگلی کمتر باشد (Andersen et al., 2002; Wiczonek et al., 2018). از این‌رو، در پژوهش حاضر نیز نمی‌توان بیشترین غلظت و بار انتقالی Cd در کاربری جنگلی را صرفاً به بیشتر بودن مقدار کل Cd در این کاربری نسبت داد. این الگو می‌تواند تا حدی ناشی از تفاوت در ویژگی‌های خاک و شرایط مؤثر بر تحرک و انتقال Cd باشد. با این حال، از آنجا که منشأ Cd و همه عوامل مؤثر بر گونه‌بندی و تحرک آن در مطالعه حاضر به‌طور مستقیم اندازه‌گیری و تفکیک نشده‌اند، نمی‌توان درباره منشأ یا سازوکار دقیق انتقال آن با قطعیت اظهار نظر کرد. بنابراین، نتایج حاضر صرفاً بیانگر تفاوت در پتانسیل انتقال Cd بین کاربری‌ها تحت شرایط آزمایش شده است و تبیین دقیق‌تر سازوکارهای انتقال و شناسایی منابع Cd به مطالعات تکمیلی نیاز دارد.

تفاوت در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نیز می‌تواند در این الگو نقش داشته باشد. خاک جنگلی دارای 40% شن، 40% سیلت و 20% رس، خاک کشاورزی دارای 30% شن، 48% سیلت و 22% رس و خاک مرتعی دارای 46% شن، 34% سیلت و 20% رس بود. بنابراین، مقدار رس در هر سه خاک مشابه، اما نسبت شن و سیلت متفاوت بود. از آنجا که ذرات ریزدانه می‌توانند محل تجمع و نگهداشت فلزات باشند، تفاوت در توزیع اندازه ذرات و Cd و Pb قابل استخراج می‌تواند بر فراهمی فلزات برای انتقال با رواناب اثرگذار باشد. با این حال، شکل‌های شیمیایی اختصاصی Cd و Pb و ظرفیت تبادل کاتیونی اندازه‌گیری نشد؛ بنابراین، سهم مستقل این سازوکارها قابل تعیین نیست.

ماده آلی کاربری‌ها نیز متفاوت و در کاربری جنگلی به 2.38% ، در مرتع و کشاورزی به‌ترتیب 1.66 و 0.86% بود. ماده آلی می‌تواند از طریق ایجاد جایگاه‌های جذب، فلزات را در خاک نگه دارد، اما ترکیبات آلی محلول نیز می‌توانند در شرایط خاص تحرک فلزات را افزایش دهند. از آنجا که در این پژوهش تنها ماده آلی کل اندازه‌گیری شد و کربن آلی محلول نیز می‌تواند در شرایط خاص تحرک فلزات را نشاند، نمی‌توان افزایش انتقال فلزات در جنگل را مستقیماً به مقدار بیشتر ماده آلی نسبت داد. علاوه بر ویژگی‌های خاک، تفاوت در حجم رواناب نیز می‌تواند بخش مهمی از تفاوت بار انتقالی بین کاربری‌ها را توضیح دهد. میانگین حجم رواناب در کاربری‌های کشاورزی، مرتعی و جنگلی به‌ترتیب 111.67 ، 181.85 و 254.78 mL بود. بنابراین، کاربری جنگلی نه تنها مقدار بیشتری Cd و Pb قابل استخراج

در خاک داشت، بلکه حجم رواناب بیشتری نیز تولید کرد. از آنجا که بار انتقالی بر اساس غلظت فلز و حجم رواناب محاسبه شد، هم‌زمانی غلظت بالاتر فلز و حجم رواناب بیشتر در کاربری جنگلی می‌تواند علت مهمی برای بار انتقالی بالاتر این کاربری باشد. این یافته با مطالعاتی که نقش کاربری اراضی و شرایط رواناب را در تفاوت غلظت و انتقال فلزات سنگین نشان داده‌اند، سازگار است (Liang et al., 2003; Soltaninia et al., 2022).

با این حال، بیشترین غلظت و بار انتقالی Pb و Cd در کاربری جنگلی را نباید به‌صورت کلی صرفاً به «جنگلی بودن» به‌عنوان یک عامل مستقل نسبت داد. در این پژوهش، کاربری جنگلی هم از نظر مقدار Pb و Cd قابل استخراج و برخی ویژگی‌های خاک و هم از نظر تولید رواناب با دو کاربری دیگر تفاوت داشت. بنابراین، نتیجه مشاهده‌شده بیانگر پتانسیل انتقال بیشتر Pb و Cd از سطح خاک جنگلی در شرایط آزمایش حاضر است. همچنین، با توجه به مقیاس کوچک پلات‌های آزمایشی، ویژگی‌های موضعی سطح خاک و اثرات ناشی از حاشیه پلات می‌تواند در نتایج آزمایش نقش داشته باشد؛ از این‌رو، تعمیم مستقیم یافته‌های حاضر به مقیاس کل حوزه آبخیز باید با احتیاط انجام شود.

پاسخ سرب به شدت و مدت بارندگی

افزایش شدت و مدت بارندگی عموماً موجب افزایش غلظت و بار انتقالی Pb شد. این روند را می‌توان به افزایش انرژی بارندگی، افزایش جداسازی ذرات خاک و افزایش ظرفیت انتقال رواناب نسبت داد. با افزایش شدت بارندگی، انرژی بیشتری به سطح خاک وارد شده و احتمال جداسازی و انتقال ذرات افزایش می‌یابد؛ در نتیجه، Pb همراه با رواناب و ذرات جدا شده از سطح خاک می‌تواند به مقدارن بیشتری منتقل شود. این الگوها یافته‌های مطالعات پیشین درباره افزایش انتقال فلزات سنگین در اثر تشدید فرآیندهای رواناب و فرسایش سازگار است (Huang et al., 2019; Quinton and Catt, 2007; Liu et al., 2019Q; iao et al., 2023).

یکی از نتایج قابل‌توجه مطالعه حاضر، تفاوت در الگوی پاسخ غلظت و بار انتقالی Pb بود. برهم‌کنش سه‌گانه کاربری اراضی $\times$ شدت $\times$ مدت بارندگی برای غلظت Pb معنی‌دار بود، در حالی که همین برهم‌کنش برای بار انتقالی Pb معنی‌دار نبود. این تفاوت نشان می‌دهد که پاسخ غلظت Pb و مقدار واقعی Pb خارج‌شده از سطح خاک الزاماً یکسان نیست. این موضوع را می‌توان با توجه به نحوه محاسبه بار انتقالی توضیح داد. بار انتقالی علاوه بر غلظت فلز، به حجم رواناب نیز وابسته است؛ بنابراین، تغییرات حجم رواناب می‌تواند الگوی بار انتقالی را نسبت به الگوی غلظت تغییر دهد. به عبارت دیگر، یک تیمار ممکن است غلظت Pb نسبتاً بالایی ایجاد کند، اما اگر حجم رواناب آن پایین باشد، الزاماً بیشترین بار Pb را تولید نخواهد کرد. از این‌رو، بررسی هم‌زمان غلظت، حجم رواناب و بار انتقالی می‌تواند تصویر دقیق‌تری از انتقال Pb از سطح خاک ارائه دهد. در پژوهش حاضر نیز حجم رواناب در محاسبه بار انتقالی لحاظ و رابطه آن با بار انتقالی Pb و Cd بررسی شد.

پاسخ کادمیوم به شدت و مدت بارندگی

افزایش شدت بارندگی با افزایش انرژی برخورد قطرات، تخریب خاکدانه‌ها و تشدید جداسازی ذرات، شرایط را برای آزادسازی و انتقال Cd فراهم می‌کند. از سوی دیگر، افزایش حجم رواناب، زمان و ظرفیت بیشتری برای شست‌وشوی سطح خاک و انتقال فلزات فراهم می‌سازد. هوانگ و همکاران (۲۰۱۹) نیز در آزمایش شبیه‌سازی بارندگی گزارش کردند که افزایش شدت بارندگی با افزایش رواناب و تلفات Cd همراه بود و فرآیندهای مرتبط با تولید رسوب در انتقال این فلز نقش داشتند (Huang et al., 2019). وابستگی پاسخ Cd به شدت بارندگی به کاربری اراضی در مطالعه حاضر را می‌توان ناشی از تفاوت شرایط سطح خاک، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و وضعیت تولید رواناب و رسوب در کاربری‌های مختلف دانست. اگرچه ویژگی‌های pH، شوری، ماده آلی، بافت و غلظت قابل‌جذب Pb و Cd در خاک هر سه کاربری اندازه‌گیری شده، اما سهم نسبی هر کدام در تفاوت انتقال فلزات به‌طور مستقل بررسی نشد. معنی‌دار بودن برهم‌کنش شدت و مدت بارندگی برای غلظت Cd نیز نشان می‌دهد که اثر افزایش مدت بارندگی الزاماً مستقل از شدت رخداد نیست. در شدت‌های پایین‌تر، تداوم بارندگی می‌تواند زمان بیشتری برای شست‌وشوی سطح خاک و انتقال Cd فراهم کند، در حالی که در شدت‌های بالاتر، بخش عمده فرآیند جداسازی و انتقال ممکن است در مراحل اولیه رخداد بارندگی ایجاد شده باشد. بنابراین، افزایش مدت بارندگی

در همه شرایط الزاماً به افزایش مشابه غلظت Cd منجر نمی‌شود. این موضوع اهمیت بررسی هم‌زمان شدت و مدت بارندگی را در ارزیابی انتقال فلزات نشان می‌دهد.

تفاوت در الگوی غلظت و بار انتقالی Cd نیز در تفسیر فرآیند انتقال اهمیت دارد؛ زیرا غلظت مقدار Cd در واحد حجم رواناب را نشان می‌دهد، در حالی که بار انتقالی علاوه بر غلظت، حجم رواناب را نیز در نظر می‌گیرد. بنابراین، تغییر در حجم رواناب می‌تواند موجب شود پاسخ بار انتقالی نسبت به غلظت متفاوت باشد. این موضوع نشان می‌دهد که ارزیابی اثر بارندگی بر انتقال Cd صرفاً بر اساس غلظت نمی‌تواند مقدار واقعی فلز خارج‌شده از سطح خاک را به‌طور کامل نشان دهد. در مجموع، نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که انتقال Cd حاصل برهم‌کنش فرآیندهای تولید رواناب، فرسایش و ویژگی‌های سطح خاک است و شدت و مدت بارندگی از طریق تغییر این فرآیندها می‌توانند مسیر و میزان انتقال Cd را کنترل کنند. با این حال، تعیین سازوکار دقیق تفاوت پاسخ Cd بین کاربری‌ها و سهم مسیر محلول و ذره‌ای، به اندازه‌گیری هم‌زمان ویژگی‌های خاک و Cd موجود در فاز محلول و رسوبی نیاز دارد.

اهمیت تفاوت بین غلظت و بار انتقالی

یکی از یافته‌های مهم این پژوهش، تفاوت در الگوی پاسخ غلظت و بار انتقالی Pb و Cd بود. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، الگوی تغییرات غلظت و بار انتقالی Pb و Cd در سطوح مختلف کاربری اراضی و شرایط بارندگی کاملاً یکسان نیست و این تفاوت، نقش حجم رواناب را در تعیین بار واقعی انتقال‌یافته نشان می‌دهد. تفاوت میان این دو شاخص در الگوی آماری Pb و Cd نیز آشکار شد. در Pb، برخی برهم‌کنش‌های عوامل بارندگی و کاربری که در غلظت معنی‌دار بودند، در بار انتقالی مشاهده نشدند. در Cd نیز برهم‌کنش شدت $\times$ مدت در غلظت معنی‌دار بود، اما در بار انتقالی معنی‌دار نبود، در حالی که برهم‌کنش کاربری $\times$ شدت در هر دو شاخص معنی‌دار باقی ماند. این تفاوت نشان می‌دهد که تغییر حجم رواناب می‌تواند الگوی پاسخ غلظت را هنگام تبدیل به بار انتقالی تعدیل کند. از دیدگاه فرآیندی، این موضوع اهمیت زیادی دارد؛ زیرا افزایش غلظت فلز الزاماً به معنای افزایش متناسب مقدار فلز خارج‌شده از سطح خاک نیست. بنابراین، ارزیابی انتقال فلزات بر اساس غلظت و بار انتقالی می‌تواند دو جنبه مکمل از فرآیند انتقال را آشکار کند. همبستگی مثبت و معنی‌دار بار Pb و Cd با حجم رواناب و رسوب نیز اهمیت این موضوع را تأیید کرد. قوی‌تر بودن رابطه بار انتقالی با رواناب نسبت به رسوب، به‌ویژه برای Pb، نشان می‌دهد که حجم آب تولیدشده در رخداد بارندگی یکی از عوامل مهم تعیین‌کننده مقدار فلز خروجی بوده است. در عین حال، ارتباط مثبت بار انتقالی با رسوب بیانگر آن است که فرآیندهای فرسایشی و جابه‌جایی ذرات نیز در انتقال فلزات نقش داشته‌اند؛ هرچند با توجه به نبود اندازه‌گیری مستقیم Pb و Cd در رسوب، نمی‌توان سهم کمی مسیر ذره‌ای را تعیین کرد. در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از غلظت و بار انتقالی به‌صورت هم‌زمان ارزیابی کامل‌تری از انتقال Pb و Cd فراهم می‌کند.

نقش رسوب در انتقال سرب و کادمیوم

نتایج این پژوهش نشان داد که فرآیندهای فرسایشی می‌توانند در انتقال Pb و Cd از سطح خاک نقش داشته باشند. فرآیند فرسایش می‌تواند موجب غنی‌شدن رسوب از فلزات سنگین شود و ذرات ریزدانه، به‌ویژه سیلت و رس، نقش مهمی در انتقال این عناصر دارند (Quinton and Catt 2007). همچنین فرسایش خاک می‌تواند مسیر مهمی برای جابه‌جایی Pb، Cd و سایر عناصر کمیاب از سطح خاک به مناطق پایین دست و محیط‌های آبی باشد (Liu et al., 2019). از دیدگاه فرآیندی، ارتباط میان رسوب و انتقال فلزات را می‌توان ناشی از همراهی بخشی از فلزات با ذرات خاک و انتقال هم‌زمان آن‌ها با جریان سطحی دانست. این موضوع به‌ویژه برای فلزاتی مانند Pb که تمایل قابل توجهی به جذب سطحی بر روی ذرات ریزدانه و ماده آلی دارند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. با این حال، شدت این ارتباط به ویژگی‌های خاک، مقدار ماده آلی، بافت و اندازه ذرات، pH و شکل شیمیایی فلز نیز وابسته است (Renella, 2004). در مطالعه حاضر نیز همبستگی مثبت بین مقدار رسوب و بار انتقالی Pb و Cd مشاهده شد که از نقش بالقوه فرآیندهای فرسایشی در انتقال این فلزات حمایت می‌کند. با این حال، از آن‌جا که غلظت یا بار Pb و Cd در بخش جامد رسوب به‌صورت جداگانه اندازه‌گیری نشده، نمی‌توان سهم کمی مسیر ذره‌ای را از مسیر محلول تفکیک کرد. ولی می‌توان نشانه‌ای از همراهی فرآیندهای فرسایشی با انتقال فلزات دانست، نه دلیلی قطعی بر انتقال مستقیم فلزات از طریق رسوب.

پیامدهای مدیریتی برای حوزه آبخیز کوهدشت

نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش شدت بارندگی با افزایش رواناب، رسوب و بار انتقالی Pb و Cd همراه بود. بنابراین، مدیریت انتقال این فلزات باید علاوه بر پایش غلظت، بر کاهش تولید رواناب و فرسایش سطحی نیز متمرکز باشد. استفاده از پوشش گیاهی مناسب و نوارهای حائل در مسیر رواناب می‌تواند با افزایش نفوذ، کاهش سرعت جریان و بهبود رسوب‌گذاری، حجم رواناب و انتقال ذرات و آلاینده‌های همراه را کاهش دهد (Deng et al., 2024; Hudson et al., 2024). با توجه به این‌که در تحقیق حاضر، کاربری جنگلی بیشترین غلظت و بار انتقالی Pb و Cd و همچنین بیشترین حجم رواناب را نشان داد، توجه ویژه به کنترل رواناب و فرسایش، به‌ویژه در شرایط بارندگی شدید، اهمیت دارد. با این حال، انتخاب و طراحی اقدامات مدیریتی باید متناسب با شرایط محلی، ویژگی‌های خاک، شیب، پوشش سطحی و مسیرهای جریان رواناب در حوزه آبخیز کوهدشت باشد و اقداماتی مانند حفظ پوشش گیاهی، افزایش بقایای گیاهی، کاهش طول و تمرکز مسیر جریان و ایجاد نوارهای حائل می‌توانند در کاهش پتانسیل انتقال فلزات سنگین مؤثر باشند.

با این حال، ارزیابی کمی اثر بخشی هر یک از این اقدامات مدیریتی نیازمند مطالعات میدانی و آزمایش‌های مدیریتی مستقل است. در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان داد که انتقال Pb و Cd در رواناب حاصل برهم‌کنش شرایط بارندگی، کاربری اراضی و فرآیندهای هیدرولوژیکی و فرسایشی است. تفاوت الگوی آماری غلظت و بار انتقالی نیز نشان داد که غلظت به‌تنهایی نمی‌تواند مقدار واقعی خروج فلزات از سطح خاک را بیان کند و در نظر گرفتن حجم رواناب برای ارزیابی بار انتقالی ضروری است. از سوی دیگر، ارتباط معنی‌دار بار فلزات با رواناب و رسوب اهمیت فرآیندهای انتقال آب و ذرات را در جبهه‌جایی این آلاینده‌ها نشان داد. بنابراین، مدیریت یکپارچه رواناب، فرسایش و رسوب، به‌ویژه در رخدادهای بارندگی شدید، می‌تواند یکی از محورهای مهم کاهش خطر انتقال Pb و Cd در حوزه آبخیز کوهدشت باشد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که شدت و مدت بارندگی و کاربری اراضی بر تولید رواناب، رسوب و انتقال Pb و Cd تأثیرگذار بودند. افزایش شدت بارندگی موجب افزایش غلظت و بار انتقالی هر دو فلز شد و بیشترین مقادیر بار انتقالی Pb و Cd در شرایط شدت بالاتر بارندگی مشاهده شد. همچنین، کاربری جنگلی در شرایط آزمایش حاضر بیشترین غلظت و بار انتقالی هر دو فلز را نشان داد. پاسخ Pb و Cd به شدت، مدت و کاربری اراضی کاملاً یکسان نبود و نوع و شدت اثر متغیرهای بارندگی به فلز مورد مطالعه و شرایط کاربری وابسته بود. همبستگی مثبت بار انتقالی Pb و Cd با حجم رواناب و مقدار رسوب نشان داد که افزایش رواناب و فرآیندهای فرسایشی با افزایش انتقال این عناصر در شرایط آزمایش همراه بود. بنابراین، در مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود Pb و Cd در فاز محلول و بخش جامد رسوب به‌صورت هم‌زمان اندازه‌گیری شوند. همچنین، بررسی نقش ویژگی‌هایی مانند pH، ماده آلی، بافت خاک و شکل شیمیایی فلزات و ارزیابی کارایی روش‌های کنترل رواناب و فرسایش، از جمله نوارهای حائل و پوشش گیاهی، می‌تواند به درک بهتر و کاهش انتقال این عناصر در حوزه‌های آبخیز کمک کند.

منابع

۱. بیات، رضا؛ عرب‌خدری، محمود؛ پرویزی، یحیی و گرامی، زهرا (۱۴۰۰). تعیین نفوذپذیری مناطق استحصال آب باران با استفاده از شبیه‌ساز صحرایی. *سامانه‌های سطوح آبخیز باران*، ۹(۲)، ۱۰-۱.
۲. پرهت، جهانگیر؛ عباسی، علی اکبر و خوشبزم، الهام (۱۳۹۳). بررسی رابطه ضریب رواناب و شدت بارش در اراضی مرتعی (مطالعه موردی: سنگانه کلات). *سامانه‌های سطوح آبخیز باران*، ۱۲(۱)، ۶۱-۶۷.
۳. خالدی درویشان، عبدالواحد؛ صادقی، سید محمدرضا؛ همائی، مهدی و عرب‌خدری، محمود (۱۳۹۳). تأثیرپذیری زمان شروع و ضریب رواناب از شدت بارندگی و رطوبت پیشین خاک در پلات‌های آزمایشگاهی. *پژوهش آب/یران*، ۸(۲)، ۴۱-۴۹.

۴. خالدی درویشان، عبدالواحد؛ همایون فر، وفا و صادقی، سید حمیدرضا (۱۳۹۵). طراحی، ساخت و واسنجی شبیه ساز باران قابل حمل برای مطالعات صحرایی روان آب و فرسایش خاک. *مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*. ۱۰ (۳۴)، ۱۰۵-۱۱۲.
۵. علی رمایی، رامیار؛ خالدی درویشان، عبدالواحد و عرب خدری، محمود (۱۳۹۷). اثر شدت بارندگی و شیب بر نفوذ و رواناب سطحی در دیمزارهای منطقه کلاله استان گلستان. *مهندسی و مدیریت آبخیز*. ۱۰ (۴)، ۷۱۴-۷۲۶.
۶. علی دوست، مسعود؛ نقدی، رامین؛ نیکوی، مهرداد و پیروان، حمیدرضا (۱۴۰۳). تأثیر شیب دامنه و شدت‌های مختلف بارندگی با شبیه‌ساز باران بر رواناب و هدررفت خاک یک سال پس از آتش‌سوزی جنگل (جنگل شنرود گیلان). *مجله جنگل ایران*. ۱۶ (۲)، ۲۵۷-۲۷۱.
۷. قربانی، اکرم؛ علیپور، محمد جواد و غفوری، محمد (۱۴۰۲). بررسی میزان آلودگی و ریسک اکولوژیکی فلزات کادمیوم و سرب در خاک پایین دست محل دفن (مطالعه موردی: شهر تایباد). *پژوهش در بهداشت محیط*. ۹ (۲)، ۲۲۳-۲۳۲.
۸. کاویان، عطاله؛ عسگریان، راضیه؛ جعفریان جلودار، زینب و بهمنیار، محمدعلی (۱۳۹۲). اثر خصوصیات خاک بر تولید روان‌آب و رسوب در مقیاس مزرعه (مطالعه موردی بخشی از اراضی کشاورزی اطراف شهرستان ساری). *دانش آب و خاک*. ۲۳ (۴)، ۴۵-۵۷.
۹. معیری، محمد هادی؛ مقدمی‌راد، مصطفی؛ عبیدی، احسان و قربانی واقعی، حجت (۱۳۹۷). اثر تراکم پوشش گیاهی بر رواناب و هدررفت خاک فرسایش بین‌شیاری در ترانشه‌خاکبرداری جاده‌جنگلی (مطالعه موردی: جنگل کوه‌میان-آزادشهر). *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*. ۲۵ (۲)، ۲۱۹-۲۳۳.
۱۰. واعظی، علی‌رضا و عبادی، مهدی (۱۳۹۶). توزیع اندازه ذرات متفله در اثر فرسایش سطحی در شدت‌های مختلف باران و درجات شیب آب و خاک. ۳۱ (۳)، ۲۱۶-۲۲۹.
۱۱. واعظی، علی‌رضا؛ بشارت، فرزاد و آذری فام، فرشته (۱۴۰۳). تأثیر الگوی توزیع زمانی شدت بارندگی بر رواناب و هدررفت خاک در دامنه‌ای شیب‌دار در منطقه نیمه‌خشک. *علوم آب و خاک*. ۴۱ (۴)، ۲۳-۳۴.

REFERENCES

- Alidoust, M., Naghdi, R., Nikooy, M. & Peyrowan, H.R. (2024). Effect of slope and different intensities of rainfall using rain simulator on runoff and soil loss one year after forest fire (Shenroud Forest, Guilan). *Iranian Journal of Forest*, 16(2). (In Persian)
- Aliramayee, R., Khaledi Darvishan, A. & Arabkhedri, M. (2018). Effect of rainfall intensity and slope gradient on infiltration and surface runoff in rainfed lands of Kalaleh region, Golestan Province. *Watershed Engineering and Management*, 10(4): 714–726. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.117882>. (In Persian)
- Alloway, B. J. (2013). *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and Their Bioavailability*. 3rd ed. Dordrecht: Springer
- American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (22nd ed.). American Public Health Association.
- Andersen, M.K., Refsgaard, A., Raulund-Rasmussen, K., Strobel, B.W. & Hansen, H.C.B. (2002). Content, distribution, and solubility of cadmium in arable and forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, 66: 1829–1835. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1829>
- Bayat, R., Arabkhedri, M., Parvizi, Y., Gerami, Z. (2021). Determination of soil infiltration in rainwater catchment areas using field rain simulator. *Journal of Rainwater Catchment Systems*, 9(2), 1–10. (In Persian).
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Bulk density. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 1. Physical and mineralogical methods* (2nd ed., pp. 363–375). American Society of Agronomy & Soil Science Society of America.
- Defersha, M.B. and Melesse, A.M. (2012). Effect of rainfall intensity, slope and antecedent moisture content on sediment concentration and sediment enrichment ratio. *Catena*, 90, pp. 47–52. doi:10.1016/j.catena.2011.11.002
- Degryse, F., Smolders, E. & Parker, D. R. (2009). Partitioning of metals (Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Zn) in soils: concepts, methodologies, prediction and applications – a review. *European Journal of Soil Science*, 60: 590–612. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01142.x>
- Deng, J., Li, Z., Li, B., Xu, C., Wang, L. & Li, Y. (2024). Wide Riparian Zones Inhibited Trace Element Loss in Mining Wastelands by Reducing Surface Runoff and Trace Elements in Sediment. *Toxics*, 12(4): 279. <https://doi.org/10.3390/toxics12040279>

- Galdos, M.V., De Maria, I.C., Camargo, O.A. & Dechen, S.C.F. (2009). Sewage sludge application on cultivated soils: Effects on runoff and trace metal load. *Scientia Agricola*, 66(3): 368–376. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162009000300012>
- Gee, G. W. & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. In *Methods of Soil Analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. edited by Arnold Klute. Madison: American Society of Agronomy & Soil Science Society of America. 383–411
- Ghorbani, A., Alipoor, M. J. & Ghafoori, M. (2023). Investigating the level of contamination and ecological risk of cadmium and lead metals in the soil downstream of the burial site (case study: Taibad city). *Journal of Research in Environmental Health*, 9 (2), 223–232. <https://doi.org/10.22038/jreh.2023.68065.1553> (In Persian)
- Girmay, G., Singh, B.R., Nyssen, J. and Borrosen, T. (2009). Runoff and sediment-associated nutrient losses under different land uses in Tigray, Northern Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 376(1–2), pp. 70–80. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.07.066
- Gómez, J.A. and Nearing, M.A. (2005). Runoff and sediment losses from rough and smooth soil surfaces in a laboratory experiment. *Catena*, 59(3), pp. 253–266. doi:10.1016/j.catena.2004.09.008
- Hou, D., O'Connor, D., Igalavithana, A. D., Alessi, D. S., Luo, J., Tsang, D. C. W., Sparks, D. L., Yamauchi, Y., Rinklebe, J., & Ok, Y. S. (2020). Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(7): 366–381.
- Huang, B., Yuan, Z., Li, D., Nie, X., Xie, Z., Chen, J., Liang, C., Liao, Y. & Liu, T. (2019). Loss characteristics of Cd in soil aggregates under simulated rainfall conditions. *Science of the Total Environment*, 650(1): 313–320. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.327>
- Hudson, C., Lovell, H., Pearson, A.W., Schaefer, M. & Soar, P.J. (2024). A GIS-based approach to site vegetated buffer strips for erosion control within an agricultural catchment in southern England. *Hydrological Processes*, 38(5): e15165. <https://doi.org/10.1002/hyp.15165>
- International Organization for Standardization (ISO). (2005). *Sediment in streams and canals—Determination of concentration, particle size distribution and relative density* (ISO Standard No. 4365:2005). <https://www.iso.org/standard/36315.html>
- Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace Elements in Soils and Plants*. 4th ed. Boca Raton: CRC Press.
- Kavian, A., Asgarian, R., Jafarian Jeloudar, Z. & Bahmanyar, M. A. (2014). Effect of soil properties on runoff and sediment yield in farm scale (Case study: a part of Sari township neighboring croplands). *Water and Soil Science*, 23(4): 45–57. (In Persian)
- Khaledi Darvishan, A. V., Homayonfar, V. & Sadeghi, S.H.R (2016). Designing, construction and calibration of a portable rainfall simulator for field runoff and soil erosion studies. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 10(34): 105–112. (In Persian)
- Khaledi Darvishan, A.V., Sadeghi, S.H.R., Homaei, M. & Arabkhedri, M. (2014). Affectability of runoff threshold and coefficient from rainfall intensity and antecedent soil moisture content in laboratorial erosion plots. *Iranian Journal of Water Research*, 8(15): 41–49. (In Persian)
- Kleinman, P.J.A., Srinivasan, M.S., Dell, C.J., Schmidt, J.P., Sharpley, A.N. and Bryant, R.B. (2006). Role of rainfall intensity and hydrology in nutrient transport via surface runoff, *Journal of Environmental Quality*. 35(4), pp. 1248–1259. doi:10.2134/jeq2006.0015
- Li, J., He, M., Han, W. & Gu, Y. (2009). Analysis and assessment on heavy metal sources in the coastal soils developed from alluvial deposits using multivariate statistical methods. *Journal of Hazardous Materials*, 164(2–3): 1150–1159. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.08.112>
- Li, X. & Feng, L. (2012). Multivariate and geostatistical analyzes of metals in urban soil of Weinan industrial areas, Northwest of China. *Atmospheric Environment*, 46: 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.11.041>
- Liang, T., Wang, H., Zhang, X., Zhang, S. & Yu, X. (2003). Transportation processes and rates of heavy metals in an artificial rainstorm runoff under different land use types. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao*, 14(10): 1756–1760
- Lindsay, W. L. & Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3): 421–428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>.
- Liu, J., Liang, Y., Gao, G., Dunkerley, D. & Fu, B. (2022). Quantifying the effects of rainfall intensity fluctuation on runoff and soil loss: From indicators to models. *Journal of Hydrology*, 607: 127494. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127494>
- Liu, M., Zhang, Q., Ge, S., Mason, R. P., Luo, Y., He, Y., Xie, H., Sa, R., Chen, L. & Wang, X. (2019). Rapid increase in the lateral transport of trace elements induced by soil erosion in major karst regions in China. *Environmental Science & Technology*, 53(8): 4206–4214. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06143>
- Marques, M.J., Bienes, R., Jiménez, L. & Pérez-Rodríguez, R. (2007). Effect of vegetal cover on runoff and soil erosion under light intensity events. Rainfall simulation over USLE plots. *Science of the Total Environment*, 378(1–2): 161–165. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.01.043>

- McBride, M. B. (1994). *Environmental Chemistry of Soils*. New York: Oxford University Press
- Moayeri, M. H., Moghadamirad, M., Abdi, E. & Ghorbani Vagheie, H. (2018). Effect of vegetation cover percentage on runoff and soil loss of interrill erosion in forest road cutslope (Case study: Kohmiyan Forest, Azadshahr). *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(2): 219-233. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.12464.2719> (In Persian)
- Moghaddam, A.H., Hashemi, S.H. & Bashtamian, M. (2025). Source identification, accumulation and dispersion of heavy metals pollution into the surface sediments of urban runoff (case study, channels of Tehran City). *J Environ Health Sci Engineer*, 23: 12. <https://doi.org/10.1007/s40201-025-00938-0>
- Porhemat, J., Abbasi, A.A. & Khoshbazzm, E. (2014). Investigate the relationship between runoff coefficient and rainfall intensity on pasture land (Case study: Sanganeh Kalaat). *Journal of Rainwater Catchment Systems*, 2(1): 61–67. (In Persian)
- Qiao, P., Wang, S., Li, J., Zhao, Q., Wei, Y., Lei, M., Yang, J., & Zhang, Z. (2023). Process, influencing factors, and simulation of the lateral transport of heavy metals in surface runoff in a mining area driven by rainfall: A review. *Science of the Total Environment*, 857(1): 159119. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159119>
- Quinton, J. N. & Catt, J. A. (2007). Enrichment of heavy metals in sediment resulting from soil erosion on agricultural fields. *Environmental Science & Technology*, 41(10): 3495–3500. <https://doi.org/10.1021/es062147h>
- Renella, G., Landi, L. & Nannipieri, P. (2004). Degradation of low molecular weight organic acids complexed with heavy metals in soil. *Geoderma*, 122(2–4): 311–315. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.018>
- SAS Institute Inc. (2013). *SAS/STAT® 13.1 User's Guide*. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Selahvarzi, M., Sobhan Ardakani, S., Hemmasi, A.H., Taghavi, L. & Ghoddousi, J. (2024). Analysis, spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface soils, the case of Khorramabad, Iran. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 104(20): 8955–8976. <https://doi.org/10.1080/03067319.2023.2217749>
- Sharafi, S., Sharafi, M., & Lorvand, M. (2026). Soil–water–crop pathways of heavy metal contamination and human health risks in intensive smallholder farms of the Nahavand Plain, Iran. *Scientific Reports*, 16(1): 9947. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-38637-x>
- Simpson, I. M., Winston, R. J., & Brooker, M. R. (2022). Effects of land use, climate, and imperviousness on urban stormwater quality: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 809, 152206. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152206>
- Soltaninia, S., Taghavi, L., Hosseini, S. A., Motamedvaziri, B. & Eslamian, S. (2022). The effect of land-use type and climatic conditions on heavy metal pollutants in urban runoff in a semi-arid region. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 12(4): 384–402. <https://doi.org/10.2166/wrd.2022.046>
- Sourghali, M., Feizizadeh, B., Matinfar, H., & Makki, M. (2026). Remote sensing–based prediction of lead (Pb) and cadmium (Cd) contamination in agricultural soils: Data-driven approaches for food safety and environmental risk assessment. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 43: 102118. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2026.102118>
- Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3—Chemical methods* (pp. 475–490). Soil Science Society of America.
- Vaezi, A.R. and Ebadi, M. (2017). Particle size distribution of surface-eroded soil in different rainfall intensities and slope gradients', *Journal of Water and Soil*, 31(1), pp. 216–229. (In Persian).
- Vaezi, A.R., Besharat, F. & Azarifam, F. (2025). The Effect of Temporal Distribution Pattern of Rainfall Intensity on Runoff and Soil Loss in a Hillslope in a Semi-Arid Region. *Journal of Water and Soil*, 28(4): 23–34. (In Persian)
- Walkley, A. & Black, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1): 29–38. <https://doi.org/10.1093/00010694-193401000-00003>
- Wieczorek, J., Baran, A., Urbański, K. et al. (2018). Assessment of the pollution and ecological risk of lead and cadmium in soils. *Environmental Geochemistry and Health*, 40: 2325–2342. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0100-5>
- Xian, L., Lu, D., Zheng, F., Fang, J., Yang, Y., Feng, J., Wu, D., Peñuelas, J. & Zeng, S. (2026). Heavy rainfall shunts heavy metal transport from runoff to dominant sediment pathways in sludge-amended forest soils. *Journal of Hazardous Materials*, 503, 141184. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2026.141184>
- Zhang, K.F., Li, H., Fu, D.F., Zhou, F. and Chen, M. (2011). Characteristics of heavy metal pollution in runoff from three different types of roofs. *Huanjing Kexue Xuebao*, 31(4), pp. 724–730
- Zhang, Y., Zhang, X., Bi, Z., Yu, Y., Shi, P., Ren, L. & Shan, Z. (2020). The impact of land use changes and erosion process on heavy metal distribution in the hilly area of the Loess Plateau, China. *Science of the Total Environment*, 718: 137305
- Zhao, B., Liu, Y., Yang, Z., Liu, J., Tan, Z., Zhang, H., Xu, Y., & Liang, L. (2025). Pollution and ecological risk of heavy metals and arsenic in road-deposited sediment and rainfall runoff of a coal port in Northern China. *Marine Pollution Bulletin*, 215: 117844. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117844>