



Investigating the Impacts of Heavy Metals and the Environmental on the Soil Biodiversity (Hexapoda: Collembola)

Ensieh Saberi Pour^a, Fatemeh Tabatabaei Yazdi^{b*}, Morteza Kahrarian^c

^a MA Student in Sciences and Environmental Engineering, Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

^b Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

^c Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Kermanshah branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

Received: 28 November 2022

Revised: 26 December 2022

Accepted: 12 January 2023

Abstract

The increasing population, the expansion of industrial and urban wastewater, and the lack of proper treatment have significantly contributed to the existence heavy metals in the soil ecosystem. Preventing the impacts of heavy metals on the quality and health of the soil ecosystem requires selecting appropriate bioindicators. Thus, this study aims to investigate the impacts of heavy metals and the effective environmental parameters of the soil on Collembola, at genus level. For this purpose, in two stages, soil samples were taken from the stations around Charmshahr industrial wastewater treatment plant and Khin Arab and Parkandabad municipal wastewater treatment plants in Mashhad, Iran. Twenty-eight soil samples, each obtained by mixing four sub-samples, were collected from 14 stations. Statistical analysis was performed using R software. In the studied area, a total of 15 genera of Collembola were identified. All these genera were reported for the first time from Mashhad. The results of comparing the concentration of chemical parameters and the genera richness in Collembola showed that there is a significant correlation between them. The results show that the number of genera has a negative correlation with two metals, iron and chromium, and among the measured elements in soil, only total carbon has a positive correlation with the number of genera ($p < 0.05$). The results of the canonical correspondence analysis showed that the response of the abundance of each Collembola genera to the concentrations of heavy metals and the environmental parameters is different. Thus, even if Collembola is advising as a proper bioindicator, we should mention that the response of the biodiversity to the abiotic parameters in soil is various, which must be deliberated in the ecosystem management.

Keywords: Biodiversity, Bioindicator, Environment, Heavy Metals, Pollution

*.Corresponding author: Fatemeh Tabatabaei Yazdi Email: f.tabatabaei@um.ac.ir Tel: +989396330571

How to cite this Article: Saberi Pour, E., Tabatabaei Yazdi, F., & Kahrarian, M. (2023). Investigating the impacts of heavy metals and the environmental on the soil biodiversity (Hexapoda: Collembola). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(2), 187-205.

DOI: 10.22067/geoeh.2023.79797.1308



Journal of Geography and Environmental Hazards are fully compliant With open access mandates, by publishing its articles under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).





Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 12, Issue 2 - Number 46, Summer 2023

<https://geoeh.um.ac.ir>

 <https://doi.org/10.22067/geoeh.2023.79797.1308> 

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال دوازدهم، شمارهٔ چهارم و ششم، تابستان ۱۴۰۲، صص ۱۸۷-۲۰۵
مقاله پژوهشی

بررسی تأثیرات فلزات سنگین و پارامترهای محیطی بر تنوع زیستی خاک (دم‌فنیان؛ Hexapoda: Collembola)

انسبه صابری‌پور- کارشناسی ارشد علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
فاطمه طباطبائی یزدی^۱- عضو هیئت‌علمی گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
مرتضی کهراریان- دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، واحد کرمانشاه دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۹/۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۵ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۱۰/۲۲

چکیده

رشد روزافزون جمعیت، گسترش فاضلاب‌های صنعتی و شهری و عدم تصفیه صحیح به‌طور قابل‌توجهی منجر به افزایش سطح فلزات سنگین در اکوسیستم خاک گشته است. پیشگیری از اثرات فلزات سنگین بر سلامت اکوسیستم خاک نیازمند انتخاب شاخص‌های زیستی مناسب است. تحقیق حاضر به بررسی تأثیرات فلزات سنگین و پارامترهای محیطی مؤثر خاک روی جنس‌های دم‌فنیان از بن‌سپیان می‌پردازد. بدین منظور در دو مرحله از ایستگاه‌هایی در محیط پیرامون تصفیه‌خانه‌های فاضلاب صنعتی و شهری چرمشهر، خین‌عرب و پرکنندآباد شهرستان مشهد در ایران نمونه‌برداری انجام شد. ۲۸ نمونه خاک که هر نمونه از اختلاط چهار زیر نمونه به دست آمده بودند، از تعداد ۱۴ ایستگاه جمع‌آوری گردیدند. در مجموع ۱۵ جنس از دم‌فنیان از منطقه مطالعاتی شناسایی شد. تمامی این جنس‌ها برای اولین بار از شهرستان مشهد گزارش شده‌اند. نتایج حاصل از مقایسه غلظت پارامترهای شیمیایی و جنس‌های دم‌فنیان نشان داد بین آن‌ها همبستگی وجود دارد. تعداد جنس با دو فلز آهن و کروم همبستگی منفی داشت و از بین عناصر

Email: F.tabatabaei@um.ac.ir

۱ نویسنده مسئول: ۰۵۱۳۸۸۰۵۴۶۵

نحوه ارجاع به این مقاله:

صابری پور، انسبه؛ طباطبائی یزدی، فاطمه؛ کهراریان، مرتضی؛ ۱۴۰۲. بررسی تأثیرات فلزات سنگین و پارامترهای محیطی بر تنوع زیستی خاک (دم‌فنیان؛ Hexapoda: Collembola). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۱۲(۲). صص ۱۸۷-۲۰۵

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2023.79797.1308>

دیگر مورد آنالیز، تنها کربن کل دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری با تعداد جنس دم‌فنیان است. نتایج تحلیل تطابق متعارفی نشان داد که واکنش فراوانی هر یک از جنس‌های دم‌فنیان نسبت به پارامترهای محیطی متفاوت است. بنابراین با وجود اینکه دم‌فنیان به‌عنوان شاخص‌های زیستی مناسب توصیه می‌گردند، باید به این امر توجه داشت که تنوع زیستی به‌طور متفاوتی به عوامل غیر زیستی محیط پاسخ می‌دهد و این مهم باید در مدیریت اکوسیستمی مد نظر قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: آلودگی، شاخص‌های زیستی، تنوع زیستی، فلزات سنگین، محیط‌زیست.

۱- مقدمه

افزایش بی‌رویه جمعیت‌های انسانی و به دنبال آن آلاینده‌های محیط‌زیستی، اثرات منفی بسیاری در محیط ایجاد کرده است که دربرگیرنده انواع خسارات جبران‌ناپذیری برای انسان و محیط‌زیست است (علیزاده اقدم و همکاران، ۲۰۱۷). از مهم‌ترین آلودگی‌های محیط‌زیست می‌توان به آلودگی خاک اشاره نمود. خاک‌ها منابع تجدیدنپذیری هستند که تخریب آن‌ها می‌تواند بسیار سریع‌تر از فرآیندهای تشکیل و اصلاح انجام شود. آلودگی خاک می‌تواند عواقب پایدار محیط‌زیستی و اجتماعی-اقتصادی داشته باشد (النگبوی^۱ و همکاران، ۲۰۲۱؛ کویتکووسکا-مالینا^۲، ۲۰۱۸). فلزات سنگین از اصلی‌ترین و عمده‌ترین عوامل آلودگی خاک هستند. هنگامی که این فلزات بیش‌ازحد وارد ماتریکس خاک می‌شوند، باعث پایین آوردن بهره‌وری خاک و کیفیت اکوسیستم آن می‌شوند (ژانگ^۳ و همکاران، ۲۰۲۱). فلزات سنگین به دلیل اثرات منفی فزاینده آن‌ها در سطوح اکولوژیکی، زیست‌محیطی، تکاملی و تغذیه‌ای به یک مسئله جهانی تبدیل شده‌اند. متأسفانه به دلیل فعالیت‌های انسانی از قبیل تولید فاضلاب، توسعه معادن، کشاورزی و کاربردهای چندگانه‌ای که فلزات سنگین دارند اکوسیستم خاک در معرض آلودگی شدید آن‌ها قرار می‌گیرد (ان. شارما^۴ و همکاران، ۲۰۲۱).

در سطح جهانی، بیش از ۸۰ درصد از فاضلاب‌های تصفیه نشده به محیط‌زیست تخلیه می‌شوند که صنعت ۲۸ درصد از آن را تشکیل می‌دهد (آمانزه^۵ و همکاران، ۲۰۲۲). تخلیه فاضلاب به آبراهه‌ها، به‌عنوان منبع مهمی از آلودگی فلزی در زندگی آب‌و‌خاک توصیف شده‌اند آن‌ها به‌طور مؤثری به ذرات متصل می‌شوند، در کف رودخانه تجمع می‌یابند، سپس به مناطق دیگر وارد و منبع ثانویه آلودگی می‌شوند و اکوسیستم‌ها را در معرض خطر قرار می‌دهند (پی. شارما^۶، ۲۰۲۱). فلزات سنگین ممکن است علاوه بر تصفیه‌خانه‌های صنعتی در مقادیر قابل توجهی در

1 Alengebawy et al

2 Kwiatkowska-Malina

3 Zhang et al

4 N. Sharma et al

5 Amanze et al

6 P.Sharma

تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری^۱ (WWTP) وجود داشته باشند؛ بنابراین به منظور دستیابی به هشدار اولیه، ارزیابی خطرات محیط‌زیستی و جلوگیری از کاهش کیفیت محیط‌زیست، انتخاب شاخص‌های زیستی مناسب برای ارزیابی آلودگی فلزات سنگین ضروری است (پارک^۲ و همکاران، ۲۰۱۹؛ ریخاته^۳ و سریواستاوا، ۲۰۱۹). شاخص‌های زیستی شرایط محیطی تغییر یافته را نشان داده و می‌توانند برای شناسایی و یا تعیین کمیت اثرات آلاینده‌ها بر محیط‌زیست مورد استفاده قرار گیرند (ژانگ^۴ و همکاران، ۲۰۲۱).

کلان‌شهر مشهد دارای کارخانجات صنعتی و قطب کشاورزی در شرق ایران است. فاضلاب تصفیه‌خانه‌های این شهر چه از نوع صنعتی و چه شهری وارد رودخانه کشف‌رود می‌گردند (حسینی بهلولی و همکاران، ۱۳۹۶). کشف رود پرآب‌ترین رودخانه مشهد است که از وسعت زیادی برخوردار می‌باشد. سرشاخه‌های آن از کوه‌های بینالود و سرچشمه آغاز و تا رودخانه تجن ادامه می‌یابد (جعفری و همکاران، ۱۳۹۴) بنابراین می‌تواند بار آلودگی را انتقال داده و تنوع زیستی اکوسیستم خاک را تحت تأثیر قرار دهد.

دم‌فنیان، بندپلیان کوچکی هستند که در لایه‌های بالایی خاک و در اکثر مناطق روی کره زمین زندگی می‌کنند. آن‌ها متعلق به مزوفونای خاک هستند که شامل بی‌مهرگانی با قطر بدن بین ۰/۱ تا ۲ میلی‌متر می‌شوند (وانگ^۵ و همکاران ۲۰۲۲). این میکروبن‌دپایان نقش مهمی در حفظ تنوع زیستی، چرخه مواد غذایی، انتقال انرژی در اکوسیستم‌ها ایفا می‌کنند (لی^۶ و همکاران، ۲۰۲۱؛ اسلاوسکی و اسلاوسکا^۷، ۲۰۱۹) مطالعات نشان داده است که وابستگی دم‌فنیان به ویژگی‌ها و فاکتورهای موجود در خاک باعث می‌شود که بتوان از آن‌ها به‌عنوان شاخص‌های ارزشمندی در بررسی کیفیت کلی خاک استفاده نمود و ممکن است زودتر از سایر جانداران نشان‌دهنده اختلال در اکوسیستم باشند (نورسیتا^۸ و همکاران، ۲۰۰۵؛ یلنگ^۹ و همکاران، ۲۰۲۱). در این پژوهش هدف بر آن است که اثرات غلظت فلزات سنگین و پارامترهای محیطی مؤثر خاک روی جنس‌های رده دم‌فنیان (Hexapoda: Collembola) به‌عنوان یک شاخص زیستی مورد ارزیابی قرار گیرد.

1 Waste Water Treatment Plant

2 Park et al

3 Rekhate & Srivastava,

4 Zhang et al

5 Wang et al

6 Li et al

7 Sławski & Sławska

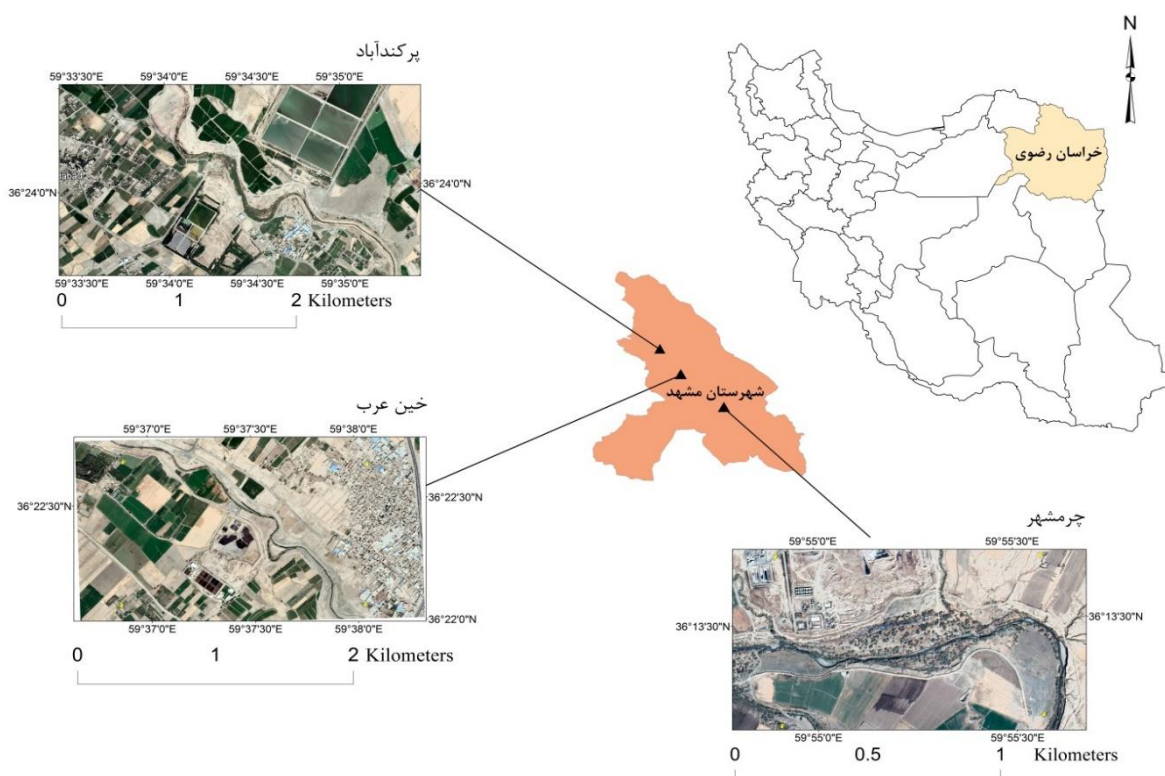
8 Nursita et al

9 Ying et al

۲- مواد و روش

۲-۱- مناطق مورد مطالعه

مناطق مورد پژوهش تصفیه‌خانه‌های چرمشهر، پرکن‌آباد و خین‌عرب در شهرستان مشهد می‌باشند (شکل ۱). تصفیه‌خانه چرمشهر در موقعیت جغرافیایی ۵۹ درجه و ۵۴ دقیقه و ۵۱ ثانیه طول جغرافیایی و ۳۶ درجه و ۱۳ دقیقه و ۳۷ ثانیه عرض جغرافیایی بعد از روستای قزقان واقع شده است. فاضلاب کارخانه‌های شهرک صنعتی چرمشهر مشهد، به این تصفیه‌خانه هدایت می‌شوند (برات‌زاده پستچی و همکاران، ۲۰۲۰). تصفیه‌خانه پرکن‌آباد با موقعیت جغرافیایی ۵۹ درجه و ۳۴ دقیقه و ۵۷ ثانیه طول جغرافیایی و ۳۶ درجه و ۲۴ دقیقه و ۱۸ ثانیه عرض جغرافیایی در روستای پرکن‌آباد، حدفاصل ۱۰ کیلومتری از شهر مشهد قرار گرفته است (مهراوران و همکاران، ۱۳۹۴). تصفیه‌خانه خین‌عرب در موقعیت جغرافیایی ۵۹ درجه و ۳۷ دقیقه و ۱۶ ثانیه طول جغرافیایی و ۳۶ درجه و ۲۲ دقیقه و ۹ ثانیه عرض جغرافیایی در روستای خین‌عرب و در ۴ کیلومتری جاده خاکی گاز شهر مشهد قرار گرفته است. تصفیه‌خانه‌های پرکن‌آباد و خین‌عرب در برگیرنده فاضلاب شهری می‌باشند (اسماعیلیان و همکاران، ۱۳۹۹).



شکل ۱- نقشه مناطق مورد مطالعه در شهرستان مشهد

۲-۲- روش‌های جمع‌آوری و شناسایی دم‌فتریان

۲-۲-۱- روش نمونه‌برداری

برای نمونه‌برداری خاک از محیط پیرامون تصفیه‌خانه چرمشهر تعداد ۶ ایستگاه (A1 تا A6) و برای هر کدام از دو تصفیه‌خانه‌های پرکن‌آباد و خین‌عرب تعداد ۴ ایستگاه نمونه‌برداری در نظر گرفته شد (خین‌عرب B1 تا B4 و پرکن‌آباد C1 تا C4) (لیو^۱ و همکاران، ۲۰۱۸). علت مغایرت تعداد ایستگاه‌ها به این جهت است که پساب تصفیه‌خانه پرکن‌آباد و خین‌عرب مستقیماً به رودخانه کشف‌رود می‌ریزند و برخلاف تصفیه‌خانه چرمشهر مسافتی را از خروجی تصفیه‌خانه تا ورود به رودخانه طی نمی‌کنند. با این تفصیل، تعداد ۲ ایستگاه در حدفاصل خروجی تصفیه‌خانه چرمشهر تا نقطه ورود پساب به رودخانه کشف‌رود در نظر گرفته شد.

نمونه‌برداری در دو سری زمانی اسفند ۱۳۹۹ و اردیبهشت ۱۴۰۰ انجام شد. ایستگاه‌های نمونه‌برداری به صورت تصادفی انتخاب گردید. در هر مرحله از نمونه‌برداری، از هر ایستگاه یک نمونه خاک برای سنجش دم‌فتریان خاک فراهم گردید این نمونه خاک از ادغام ۴ زیر نمونه خاک به دست آمد. باتوجه به اینکه موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه در هر دو دفعه نمونه‌برداری یکسان بودند برای سنجش مقادیر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی محیطی خاک، تنها در مرحله دوم نمونه‌برداری از هر ایستگاه یک نمونه خاک (هر نمونه خاک از ادغام ۴ زیر نمونه به دست آمده بود) جمع‌آوری گردید (ارینگتون^۲ و همکاران، ۲۰۱۸).

روش جمع‌آوری زیر نمونه‌های خاک جهت آنالیز دم‌فتریان بدین صورت بود: هر زیر نمونه در قطر ۱۰ Cm و تا عمق ۱۰ Cm خاک (به وسیله اندازه‌گیری با خط‌کش) با یک بیلچه جمع‌آوری و در داخل کیسه‌های پلاستیکی کددار، قرار داده شدند زیر نمونه‌های خاک به صورت حرکت زیگزاگی جمع‌آوری گردیدند در هنگام نمونه‌برداری موقعیت جغرافیایی با Gps ثبت گردید و با استفاده از نرم‌افزار Handy Gps نقاط نمونه‌برداری شده در سری دوم نمونه‌برداری مکان‌یابی شدند در نهایت ۱۴ نمونه خاک جهت آنالیز شیمیایی (برای هر نمونه سه تکرار انجام شد) جمع‌آوری شد و ۲۸ نمونه خاک جهت شناسایی دم‌فتریان در دو مرحله نمونه‌برداری فراهم گردیدند که نتایج حاصل از شناسایی دم‌فتریان در دو مرحله با یکدیگر تلفیق شدند (کوزنتسوا^۳، ۲۰۰۹؛ سانتاماریا^۴ و همکاران، ۲۰۱۲؛ سانتوروفو^۵ و همکاران، ۲۰۱۲؛ استرزیńska^۶ و همکاران، ۲۰۱۸).

1 Liu et al

2 Errington et al

3 Kuznetsova

4 Santamaría et al

5 Santorufo et al

6 Sterzyńska et al

۲-۲-۲- جداسازی دم‌فتریان

نمونه‌های خاک مربوط به دم‌فتریان به مدت ۷ روز داخل قیف‌های برلیز قرار گرفتند تا جداسازی دم‌فتریان انجام شد (کولیبالی^۱ و همکاران، ۲۰۱۷). برای شناسایی دم‌فتریان نیاز به تهیه اسلاید میکروسکوپی است؛ بنابراین ابتدا نمونه‌های دم‌فتری شفاف شدند. برای شفاف‌سازی و بسته به نوع نمونه از ۱- محلول نسبیّت (آب مقطر ۴۰ سی‌سی، کلرال هیدرات ۴۰ گرم، اسید استیک غلیظ ۲/۵ سی‌سی) استفاده شد که بسته به میزان ضخامت کوتیکول و رنگ‌دانه نمونه ممکن است هر نمونه بین چند دقیقه تا چند ساعت در محلول نسبیّت باقی بماند (کهراریان، ۱۳۹۲). ۲- استفاده از KOH برای این منظور نمونه‌ها در KOH ده درصد و به مدت یک یا دو دقیقه قرار داده شدند. پس از آن هر نمونه در آب مقطر قرار داده و به آرامی توسط یک چراغ‌الکلی تا حدودی حرارت داده شدند تا نمونه‌ها متورم شده و از حالت چسبندگی خارج شوند. این روش بیشتر برای دم‌فتریان مختلف خانواده Entomobryidae و برخی از Hypogastridae استفاده گردید (کهراریان، ۱۳۹۲). سپس براساس اشکال ظاهری بدن از قبیل سایز فورکا، تعداد بندهای شکمی و سایز آن‌ها، الگوهای رنگی، شکل سر، خارهای شکمی، وجود یا عدم وجود، موهای حسی، بندها، اندازه قفسه سینه و کلیدهای معتبری از جمله برتفلد^۲ (۱۹۹۹)، پوتاپوف^۳ (۲۰۰۲)، تیپود^۴ (۲۰۰۴)، فیلیبرگ^۵ (۲۰۰۷) و اربی و کهراریان^۶ (۲۰۱۵) شناسایی انجام شد.

۲-۳- ارزیابی پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک

پارامترهای فیزیکی و شیمیایی مورد مطالعه به سه گروه، قابل تقسیم هستند: ۱- ویژگی‌های مربوط به خاک شامل pH، EC، دما^۷ (ST) و رطوبت^۸ (SM) ۲- عناصر اصلی خاک شامل کربن کل، فسفر کل، نیتروژن کل و نسبت غلظت عنصر کربن به فسفر (C/P) و کربن به نیتروژن (C/N) ۳- فلزات متداول خاک شامل آلومینیوم، کروم، مس، آرسنیک، کادمیوم، آهن، نیکل و سرب که غلظت کل هر فلز مدنظر است. غلظت کل فلزات سنگین و عنصر فسفر توسط دستگاه پلاسما جفت شده القائی - طیف‌سنج نشر نوری^۹ و غلظت کل عناصر کربن، نیتروژن توسط دستگاه CHNOS^{۱۰} آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مورد خوانش قرار گرفتند. سنجش pH براساس نسبت انتخابی خاک به آب ۲/۵: ۱ می‌باشد؛ بنابراین در یک بشر ۱۰۰ سی‌سی، مقدار

1 Coulibaly et al

2 Bretfeld

3 Potapov

4 Thibaud

5 Fjellberg

6 Arba & Kahrarian

7 Soil Temperature

8 Soil Moisture

9 ICP- OES, SPECTRO ARCOS- 76004555

10 CHNS- FLASH EA 1112 SERIES

۱۰ گرم خاک ریخته و ۲۵ میلی لیتر آب مقطر به آن اضافه شد. سپس به وسیله یک دستگاه شیکر مخلوط و بعد از مدت کوتاهی که نمونه خاک ثلثت گردید با دستگاه pH Meter در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد قرلنت شدند (استرزینسکا^۱ و همکاران، ۲۰۱۸). EC نمونه های خاک براساس نسبت ۱:۵ به دست آمد؛ بنابراین در یک ارلن ۲۵۰ سی سی مقدار ۱۰ گرم خاک ریخته و ۵۰ میلی لیتر آب مقطر اضافه شد سپس روی یک شیکر قرار داده تا محلول یکدست شود در نهایت از کاغذ صافی عبور داده و در دمای ۲۲ درجه سانتی گراد با دستگاه EC Meter خوانش شدند (یان و مارشنر^۲، ۲۰۱۳). مقادیر پارامترهای دما و رطوبت در مناطق نمونه برداری با دستگاه های رطوبت سنج و دماسنج اندازه گیری شدند.

۲-۴- آنالیزهای آماری

آنالیزهای آماری در نرم افزار R انجام شد. بررسی توزیع نرمال بودن داده ها براساس آزمون شاپیرو ویلک^۳ صورت گرفت (استرزینسکا^۴ و همکاران، ۲۰۱۸). براساس این آزمون از بین پارامترهای فیزیکی و شیمیایی تنها آلومینیوم، آهن و دما و از بین داده های مربوط به دم فزنیان تعداد جنس از توزیع نرمال برخوردار بودند. بررسی اختلاف معنی داری میانگین تعداد جنس دم فزنیان و پارامترهای فیزیکی و شیمیایی براساس آنالیز آنوا یک طرفه^۵ و کروسکال والیس^۶ در مناطق مورد مطالعه انجام گرفت. بدین منظور برای پارامترهایی که وضعیت نرمالی داشتند از آنوا یک طرفه و در صورت وجود اختلاف معنی داری (P-value < ۰/۰۵)، برای مقایسه میانگین هایشان از آزمون تعقیبی فیشر^۷ به کار گرفته شد و برای پارامترهایی که وضعیت غیر نرمالی داشتند از آزمون کروسکال والیس که معادل آنوا یک طرفه است استفاده گردید (تیدون^۸ و همکاران، ۲۰۰۹). با توجه به اینکه در سه ایستگاه متعلق به منطقه چرم شهر هیچ دم فزنی مشاهده نگردید اطلاعات متعلق به این ایستگاه ها در محاسبات همبستگی و بررسی روابط دم فزنیان استفاده نشد (آستروی^۹ و همکاران، ۲۰۱۶). به کمک ضرایب همبستگی اسپرمن^{۱۰} و پیرسون^{۱۱} میزان همبستگی بین پارامترهای محیطی شیمیایی و فیزیکی با تعداد جنس دم فزنیان به دست آمد. همچنین از تحلیل تطابق متعارفی^{۱۲} (CCA) برای به دست آوردن روابط فراوانی هر جنس با عوامل محیطی استفاده گردید (وینکلر^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۸)

1 Sterzyńska et al

2 Yan & Marschner

3 Shapiro_Wilk Test

4 Sterzyńska et al

5 One-Way ANOVA

6 Kruskal-Wallis test

7 LSD

8 Tidona et al

9 Austruy et al

10 Spearman rank-order correlation coefficient

11 Pearson Correlation Coefficient

12 Canonical correspondence analysis

13 Winkler

این آزمون به کمک فراخوانی پکیج Library vegan انجام گردید. آزمون کروسکال والیس به کمک agricol و دستورات مربوطه انجام شدند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج متعلق به شناسایی دم‌فتریان در ایستگاه‌های مورد مطالعه

شناسایی دم‌فتریان برای اولین بار در شهرستان مشهد و در اطراف تصفیه‌خانه‌های پرکندآباد، خین‌عرب، چرمشهر و در حاشیه رودخانه کشف‌رود صورت گرفت. نتایج حاصل از شناسایی دم‌فتریان نشان داد در ایستگاه‌های اول، دوم و چهارم چرمشهر هیچ دم‌فتری دیده نشده است. در ایستگاه سوم و ششم تعداد ۱ جنس و در ایستگاه پنجم تعداد ۲ جنس وجود داشت. در ایستگاه اول خین‌عرب تعداد ۴ جنس، در ایستگاه دوم و سوم آن تعداد ۲ جنس و در ایستگاه چهارم آن تعداد ۳ جنس دیده شد. در ایستگاه اول پرکندآباد تعداد ۸ جنس، ایستگاه دوم آن تعداد ۶ جنس، ایستگاه سوم آن تعداد ۱۰ جنس و در ایستگاه چهارم آن تعداد ۵ جنس مشاهده شد (جدول ۱). جنس‌های *Ceratophysella*، *Friesea*، *Entomobrya*، *Hypogastrura* بین مناطق پرکندآباد و خین‌عرب و جنس *Hemisitoma* بین پرکندآباد و چرمشهر مشترک بودند و *Proisotoma* تنها جنسی بود که در هر سه منطقه مشاهده گردید (جدول ۱).

جدول ۱- فراوانی هر یک از جنس‌های دم‌فتریان در نمونه‌های خاک برداشت‌شده از ایستگاه‌های مورد مطالعه A۱

تا C۴ (حجم نمونه خاک برای هر ایستگاه ۲۰۰۰ سانتی‌متر مکعب می‌باشد)

ایستگاه/جنس	A۱	A۲	A۳	A۴	A۵	A۶	B۱	B۲	B۳	B۴	C۱	C۲	C۳	C۴
Desoria	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰
Proisotoma	۰	۰	۳	۰	۳۱	۱۳۶	۳۶۳	۱۰	۴۸	۴۲۲	۶۲۸	۶۶۷	۳۵۹	۵۲۹
Hypogastrura	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۲	۱	۱۷	۰	۱۲۵	۰
Ceratophysella	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۴	۰	۰	۵۵	۰	۰	۰
Sminthurinus	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۳	۰	۱	۰
Entomobrya	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۴	۰	۰	۰	۸	۷	۳۰	۷
Folsomides	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۰	۱۱	۱۰
Pseudosinella	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۶	۰	۱	۰
Friesea	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۸	۰	۴	۰	۱۵
Orthonychiurus	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۰	۴	۰
Hemisitoma	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵	۰	۰
Brachystomella	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۹	۵	۴

ایستگاه/جنس	A _۱	A _۲	A _۳	A _۴	A _۵	A _۶	B _۱	B _۲	B _۳	B _۴	C _۱	C _۲	C _۳	C _۴
Heteraphorura	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵	۰
Isotomurus	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۲	۰
Orchesella	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰

۳-۲- بررسی اختلاف معنی داری میانگین غلظت فلزات سنگین در سطح ایستگاه‌ها و مناطق مورد مطالعه

نتایج میانگین غلظت فلزات سنگین نشان داد تمام فلزات به جز فلزات مس و آلومینیوم در بین مناطق چرمشهر، خین‌عرب و پرکندآباد دارای اختلاف معنی دار هستند ($P\text{-value} < 0/05$) همچنین تمام فلزات در سطح ایستگاه‌های این مناطق، دارای تفاوت معنی دار می‌باشند ($P\text{-value} < 0/05$)؛ بنابراین مقایسه میانگین غلظت فلزات بین مناطق و ایستگاه‌ها انجام گردید (جداول ۲ و ۳).

۳-۲-۱- مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین در بین مناطق چرمشهر، خین‌عرب و پرکندآباد

نتایج حاصل از مقایسه میانگین فلزات در سطح مناطق نشان داد فلزات کروم و نیکل بیشترین میانگین غلظت را در منطقه چرمشهر دارند و بین مناطق پرکندآباد و خین‌عرب از نظر این دو فلز تفاوت معنی داری مشاهده نشد. منطقه خین‌عرب دربرگیرنده بیشترین میانگین غلظت فلزات سرب و کادمیوم می‌باشد که از لحاظ آماری میزان این دو فلز تفاوت معنی داری با منطقه پرکندآباد ندارد. فلز آرسنیک بیشترین میانگین غلظت را در خین‌عرب دارد و منطقه پرکندآباد با مناطق چرمشهر و خین‌عرب تفاوت معنی داری ندارد. بیشترین میانگین غلظت فلز آهن در چرمشهر مشاهده شد که خین‌عرب از لحاظ میانگین غلظت آهن با دو منطقه تفاوت معنی داری نشان نداد (جداول ۲).

۳-۳- بررسی اختلاف معنی داری میانگین پارامترهای ویژگی‌های خاک و عناصر اصلی در بین ایستگاه‌ها و مناطق

مورد مطالعه

طبق نتایج میانگین پارامترهای pH، EC و کربن در بین مناطق و ایستگاه‌ها دارای اختلاف معنی داری ($P < 0/05$) هستند؛ اما عناصر فسفر و نیتروژن تنها در سطح ایستگاه اختلاف معنی دار ($P\text{-value} < 0/05$) نشان دادند. پارامترهای دما و رطوبت در هیچ‌کدام از سطوح مطالعاتی (ایستگاه و منطقه) اختلاف معنی داری نداشتند ($P > 0/05$) (value) بنابراین مقایسه میانگین پارامترها بین مناطق و ایستگاه‌ها انجام گردید (جداول ۲ و ۳).

۳-۳-۱- مقایسه میانگین غلظت کل عناصر اصلی و پارامترهای ویژگی‌های خاک در بین مناطق چرمشهر، خین‌عرب

و پرکندآباد

بیشترین میانگین غلظت کربن متعلق به منطقه پرکندآباد و کمترین آن متعلق به خین‌عرب می‌باشد که منطقه خین‌عرب اختلاف معنی داری با چرمشهر ندارد. بیشترین میانگین رتبه‌ای میزان pH متعلق به چرمشهر است که از نظر

آماري با پرکندآباد اختلافی ندارد و کمترین میزان متعلق به خین عرب است. همچنین بیشترین میانگین رتبه‌ای EC متعلق به چرمشهر و کمترین آن در خین عرب مشاهده گردید (جدول ۲).

جدول ۲- مقایسه میانگین غلظت کل فلزات سنگین (میلی گرم بر کیلوگرم)، کربن کل (میلی گرم بر کیلوگرم)، EC (میکروزیمنس بر سانتی متر) و pH در بین مناطق مورد مطالعه. مقادیر با حرف یکسان تفاوت معناداری ندارند.

(تجزیه و تحلیل واریانس، $P < 0/05$ بین مناطق نمونه برداری)

پارامتر	چرمشهر	خین عرب	پرکندآباد
آرسنیک	b _{5/02}	a _{7/40}	ab _{5/82}
کادمیوم	b _{0/12}	a _{0/22}	a _{0/18}
سرب	b _{15/982}	a _{30/79}	a _{28/08}
نیکل	a ₁₆₆₇₅	b _{45/87}	b ₄₇₉₇
کروم	a _{723/00}	b _{49/21}	c _{37/90}
آهن	a ₁₈₈₄₃	ab ₁₇₃₈₃	b ₁₅₆₆₃
کربن	b ₃₁₇₄	b ₃₁₆₈₀	a ₄₆₀₁₄
pH	a _{8/19}	b _{7/90}	a _{8/33}
EC	a _{5967/0}	c ₉₉₈₃	b _{1150/0}

جدول ۳- مقایسه میانگین غلظت کل فلزات سنگین (میلی گرم بر کیلوگرم)، کربن کل (میلی گرم بر کیلوگرم)، EC (میکروزیمنس بر سانتی متر) و pH در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه A1 تا C4. مقادیر با حرف یکسان تفاوت معناداری ندارند.

(تجزیه و تحلیل واریانس، $P < 0/05$ بین ایستگاه‌های نمونه برداری)

پارامتر	A1	A2	A3	A4	A5	A6
آرسنیک	h _{2/28}	g _{4/45}	bc _{7/09}	f _{5/61}	gh _{4/34}	cd _{6/33}
کادمیوم	f _{0/30}	cd _{0/16}	cd _{0/16}	de _{0/12}	ef _{0/10}	bc _{0/18}
سرب	ij _{33/74}	j _{11/93}	i _{13/88}	de _{21/03}	h _{17/10}	g _{18/21}
نیکل	d _{147/39}	a _{196/41}	d _{145/27}	c _{164/11}	c _{169/24}	b _{178/08}
کروم	a _{2584/20}	b _{498/45}	c _{227/46}	c _{185/30}	e _{240/41}	d _{254/15}
آهن	i _{13189/1}	b _{2124/86}	a _{2273/77}	d _{1892/79}	e _{1768/8}	c _{1922/76}
مس	d _{36/13}	i _{23/13}	g _{25/51}	e _{2/59}	e _{22/93}	cd _{42/12}
آلومینیوم	a _{5784/1}	c _{871/18}	a _{966/3}	d _{1237/9}	h _{455/0}	e _{1165/4}
کربن	a ₆₄₈₇₀	e ₂₆₈₆₉	d ₃₂₆₉₉	d ₃₁₀₈₄	cd ₄₄₄₃₄	d ₃₃₀₈₈
فسفر	b _{1148/5}	c _{910/79}	f _{758/34}	i _{535/75}	i _{468/24}	h _{555/02}
نیترژن	f ₁₃₉₀	b ₁₇₄₇₀	d ₁₁₆₁₆	a ₃₄₃₀₀	i ₄₁₉₆	de ₁₀₄₆₂

پارامتر	A1	A2	A3	A4	A5	A6
pH	fgv/۹۲	cdef/۱۰۸	cdef/۱۰۷	bcd/۱۲۱	ab/۱۵۵	bc/۱۲۹
EC	b۹۵۳۷/۰	a۱۰۷۱۱/۰	d۶۲۹۷/۰	c۶۹۵۹/۳	k۶۴۵/۷	f۱۶۵۲/۷

ادامه جدول ۳

پارامتر	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
آرسنیک	abv/۵۶	f۵/۷۳	f۵/۷۲	a۱۰/۶۰	e۵/۹۵	de۶/۰۳	e۵/۹۱	f۵/۴۰
کادمیوم	ab۰/۲۱	cd۰/۱۵	de۰/۱۳	a۰/۴۲	a۰/۲۵	cd۰/۱۵	de۰/۱۲	ab۰/۲۲
سرب	bc۳/۵۵	cd۲۳/۸۷	g۱/۴۸	ab۴۲/۲۵	a۵۶۳۲	ef۲۰/۱۷	f۱۹/۵۴	h۱۶۳۰
نیکل	h۴۷/۴۶	f۱۱/۶۶	k۳۰/۷۱	i۴۳/۶۳	j۳۲/۵۸	k۳۰/۱۱	g۵۰/۹۶	e۷۴/۲۴
کروم	f۶۱/۳۴	h۵۶/۰۵	m۲۵/۳۵	i۵۴/۱۰	k۲/۸۸	l۲/۱۰	j۳۷/۲۳	g۵۷/۳۶
آهن	ef۱۷۴۷۹/۲	cd۱۹۱۹۴/۹	f۱۷۲۴۹/۹	g۱۵۶۰/۸	h۱۵۰۴۸/۱	h۱۵۱۵۰/۶	i۱۳۳۹۸/۷	cd۱۹۰۵۳/۴
مس	bc۶۶/۱۳	f۳۰/۶۱	f۳۰/۴۵	ab۷۲/۶۶	a۹۵/۳۴	h۲۴/۲۴	h۲۳/۹۳	f۳۰/۸۳
آلومینیوم	h۷۵۸۷/۳	b۸۷۹۳/۴	g۷۷۶۰/۴	k۶۷۶۱/۳	f۸۰۷۱/۱	i۷۴۲۵/۷	m۶۰۲۴/۲	j۷۰۹۰/۷
کربن	de۳۰۱۵۸	e۲۶۸۳۰	e۲۷۲۵۲	bc۴۲۴۷۹	b۴۵۰۴۰	ab۴۷۴۴۱	ab۴۶۰۴۳	b۴۵۵۳۲
فسفر	g۷۲۰/۶۱	m۴۵۵/۷۵	n۴۴۷/۴۳	d۸۴۱/۱۰	a۱۲۶۴/۲	k۴۸۰/۵۸	j۴۹۰/۷۵	e۷۳/۲۴
نیترژن	cd۱۲۵۱۵	h۵۹۹۹	f۳۷۷۶۲	ab۲۲۹۰۹	bc۱۶۸۰۷	gh۶۵۰۱	hi۵۰/۶۹	۹۲۲۲
pH	cde/۱۰۷	cdef/۱۰۸	efg/۹۷	g/۷۸	cde/۱۱۳	ab/۱۵۹	a/۶۹	fgv/۹۱
EC	n۵۱۷/۳	l۶۰/۸۷	m۵۴۲/۷	h۱۱۲۴/۳	e۱۷۵۲/۰	j۷۵۲/۳	i۹۰/۷۰	g۱۸۷/۷

۳-۴- بررسی اختلاف معنی‌داری میانگین تعداد جنس دم‌فتریان در بین مناطق چرمشهر، خین عرب و پرکنندآباد

نتایج آزمون آنوایک طرفه نشان داد بین مناطق مورد مطالعه از نظر میانگین تعداد جنس دم‌فتریان با یکدیگر اختلاف معنی‌داری ($P\text{-value} < ۰/۰۵$) وجود دارد. بیشترین میانگین تعداد جنس در منطقه پرکنندآباد و کمترین میانگین در منطقه چرمشهر مشاهده گردید (جدول ۴).

جدول ۴- مقایسات میانگین تعداد جنس در بین مناطق مورد مطالعه براساس آزمون فیشر

P-value	انحراف معیار \pm میانگین	تعداد	منطقه	
۰/۰۰۰	$c \pm 667/0 \ 0/816$	۶	چرمشهر	تعداد جنس
	$b \pm 750/2 \ 0/957$	۴	خین عرب	
	$a \pm 250/7 \ 2/22$	۴	پرکنندآباد	

(حروف غیرمشترک نشان‌دهنده تفاوت آماری معنی‌دار پارامتر مورد مطالعه در مناطق، در سطح ۰/۰۵ است)

۳-۵- مقایسه غلظت فلزات سنگین در مناطق مورد مطالعه با مقادیر حد مجاز آن‌ها در خاک

بیشترین میانگین غلظت کروم و نیکل متعلق به منطقه چرمشهر بود که ایستگاه اول چرمشهر، بیشترین میانگین فلز کروم ($2584/20 \text{ mg kg}^{-1}$) و ایستگاه دوم چرمشهر، بیشترین میانگین فلز نیکل ($1967/41 \text{ mg kg}^{-1}$) را در بین ایستگاه‌ها داشتند. غلظت این دو فلز بسیار بیشتر از مقادیر حد مجازشان در خاک (به ترتیب 150 و 50 mg kg^{-1}) ثبت گردید (جدول ۵)؛ بنابراین منطقه چرمشهر از قوی‌ترین منابع آلوده به فلزات کروم و نیکل بود. در بین ایستگاه‌های متعلق به تصفیه‌خانه‌های شهری، بیشترین میانگین فلزات کروم و نیکل به ترتیب متعلق به ایستگاه اول خین‌عرب ($61/34 \text{ mg kg}^{-1}$) و ایستگاه چهارم پرکندآباد ($74/24 \text{ mg kg}^{-1}$) بود. غلظت کروم ایستگاه اول خین‌عرب کمتر از حد مجاز ولی غلظت نیکل ایستگاه چهارم پرکندآباد بیشتر از حد مجاز در خاک بود (جدول ۵). حداکثر میانگین غلظت آلومینیوم در تمام ایستگاه‌ها کمتر از میانگین جهانی (71000) ثبت گردید (صابری کهرودی و همکاران ۲۰۲۰) همچنین بیشترین میانگین فلزات آهن، سرب، کادمیوم، آرسنیک و مس در تمام ایستگاه‌ها، کمتر از مقادیر حد مجازشان در خاک بود (جدول ۵).

جدول ۵- حداکثر مقادیر مجاز فلزات سنگین در خاک (Ashraf et al., 2019)

غلظت (mg kg^{-1})	فلزات سنگین
۳۰۰	سرب (Pb)
۳	کادمیوم (Cd)
۱۵۰	کروم (Cr)
۲۰	آرسنیک (Ar)
۵۰	نیکل (Ni)
۱۴۰	مس (Cu)
۵۰۰۰۰	آهن (Fe)

۳-۶- بررسی همبستگی بین تعداد جنس دم‌فتریان با پارامترهای فیزیکی و شیمیایی

نتایج بررسی میزان همبستگی نشان داد در سطح معنی‌داری $0/05$ ضریب همبستگی بین تعداد جنس دم‌فتریان با غلظت فلز کروم $0/611$ - و با آهن $0/776$ - می‌باشد که همبستگی منفی با یکدیگر دارند. باتوجه‌به نتایج این پژوهش، عناصر کروم و آهن (حتی پایین‌تر از غلظت مجاز) باعث ایجاد سمیت بر روی دم‌فتریان شدند مطالعات پژوهشگرانی مانند کوزنتسوا^۱ (۲۰۰۹)، لیو^۲ (۲۰۱۸)، سانتوروفو^۳ و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند رده دم‌فتریان شاخص زیستی

1 Kuznetsova

2 Liu

3 Sterzyńska et al

مناسب برای بررسی کیفیت خاک است و در خاک‌هایی با غلظت‌های بالایی از فلزات سنگین سرب و مس تنوع رده دم‌فتریان کاهش می‌یابد. در این مطالعات تنها غلظت فلزات مس و سرب اندازه‌گیری شده‌است به دلیل اینکه مطالعات پیشین آن‌ها نشان داده بود که در مکان‌های مورد مطالعه آن‌ها (پارک‌های شهری و معادن) غلظت مس و سرب زیاد بوده و احتمال اینکه باعث تفاوت در رده دم‌فتریان شوند وجود داشته است. برخلاف این پژوهش‌ها، در این مطالعه بین فلزات سرب و مس با تنوع دم‌فتریان همبستگی مشاهده نگردید که دلیل آن را می‌توان غلظت‌های بسیار پایین فلزات (حداکثر میزان سرب $56/317 \text{ mg kg}^{-1}$ و مس $95/340 \text{ mg kg}^{-1}$ می‌باشد)، بالابودن محدوده تحمل دم‌فتریان و یا سازگار شدن نسبت به این فلزات دانست (استرزینسکا^۱ و همکاران، ۲۰۱۸).

جدول ۶- بررسی همبستگی بین تعداد جنس‌های دم‌فتریان با فلزات

فلزات	آلومینیوم	کروم	مس	آرسنیک	کادمیوم	آهن	نیکل	سرب
ضریب همبستگی	-۰/۵۱۰	-۰/۶۱۱	-۰/۰۵۰	-۰/۰۷۸	۰/۱۲۹	-۰/۷۷۶	-۰/۵۷۰	۰/۴۹۲
P-value	۰/۱۰۹	*۰/۰۴۵	۰/۸۸۲	۰/۸۱۹	۰/۷۰۵	*۰/۰۰۵	۰/۰۶۷	۰/۱۲۴

(* نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح ۰/۰۵)

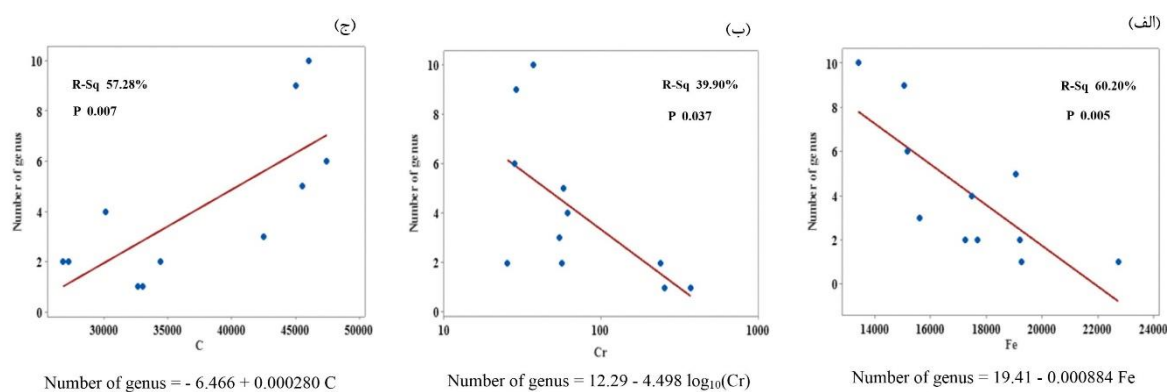
جدول ۷- بررسی همبستگی بین تعداد جنس‌های دم‌فتریان با عناصر و پارامترهای ویژگی‌های خاک

پارامتر	دما	pH	EC	رطوبت	فسفر	کربن	نیتروژن	C/N	C/P
ضریب همبستگی	۰/۲۰۳	۰/۱۹۵	-۰/۰۷۳	۰/۰۵۰	۰/۲۸۵	۰/۷۵۷	-۰/۰۳۱	۰/۴۳۸	۰/۳۵۹
P-value	۰/۵۵۰	۰/۵۶۵	۰/۸۳۰	۰/۸۸۳	۰/۳۹۵	*۰/۰۰۷	۰/۹۲۷	۰/۱۷۸	۰/۲۷۷

(* نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح ۰/۰۵)

۳-۷- بررسی ارتباط و نحوه تأثیرگذاری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی با تعداد جنس‌های دم‌فتریان

نتایج رگرسیون خطی نشان داد در میان پارامترهای مورد مطالعه تنها فلزات آهن، کروم و عنصر کربن در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ دارای ارتباط معنی‌دار با تعداد جنس دم‌فتریان می‌باشند و سایر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ با تعداد جنس ارتباط مؤثری ندارند. در شکل ۲ روابط خطی، معادلات رگرسیونی، اختلاف معنی‌داری (P-value) و ضریب تعیین (R-Sqr) نشان داده شده است. بیشترین ضریب تعیین متعلق به فلز آهن (۶۰/۲ درصد) و کمترین مقدار متعلق به کروم (۳۹/۹ درصد) می‌باشد.



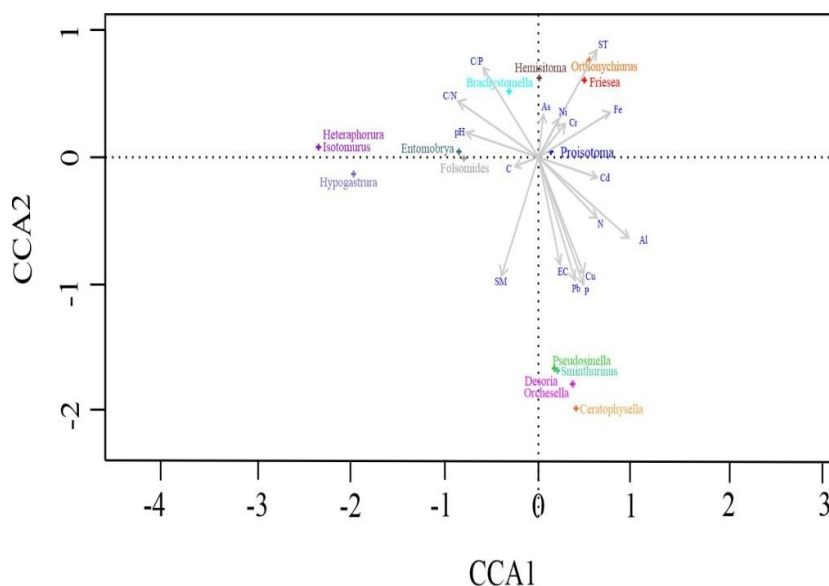
شکل ۲- بررسی ارتباط و معادلات رگرسیونی فلزات الف (آهن، ب) کروم و ج) عنصر کربن (محور طولها) با تعداد جنس‌های^۱ دم‌فتریان (محور عرضها)

۳-۸- بررسی ارتباط فراوانی هر یک از جنس‌های دم‌فتریان با پارامترهای فیزیکی و شیمیایی براساس تحلیل تطابق

متعارفی

نتایج CCA نشان داد که Pb و Fe ، P, Cu ، $ST, C/P$ ، C/N ، Al مؤثرترین عوامل تعیین‌کننده در تحلیل تطابق متعارفی هستند. فراوانی جنس *Proisotoma* بیشترین ارتباط را با عنصر آهن دارد. با وجود اینکه *Proisotoma* در نمونه‌های خاک‌های آلوده به فلز آهن نیز مشاهده شدند؛ فراوانی این جنس‌ها در مناطق آلوده کاهش یافته و به عبارتی به آلودگی آهن حساسیت نشان دادند. فراوانی جنس *Hemisotoma* با غلظت فلز آرسنیک، افزایش یافته است. نتایج به دست آمده با مطالعه انجام شده توسط کرواو و کازز^۲ (۲۰۰۵) بر روی فراوانی گونه *Folsomia Candida* مطابقت دارد. ممکن است اثر هورمیتیک^۳ اتفاق افتاده باشد و افزایش غلظت آرسنیک تاحدی که *Hemisotoma* تحمل کند محرکی برای افزایش فراوانی این جنس بوده و در مقادیر بیشتر از تحمل اثر سمیت نشان دهد (کالابرس و بالدوین^۴، ۲۰۰۳). فراوانی *Brachystomella* با نسبت کربن به فسفر ارتباط مثبت دارد همچنین ارتباط مثبت بین فراوانی *Orthonychiurus* و *Friesea* با غلظت نیکل و دما خاک مشاهده گردید. فراوانی سایر جنس‌ها ارتباط معنی‌داری با پارامترهای فیزیکی و شیمیایی ندارند (شکل ۳).

- 1 Number of genus
- 2 Crouau and Cazes
- 3 Hormetic
- 4 Calabrese & Baldwin



شکل ۳- نتایج CCA و نمودارهای ارتباط فراوانی هر یک از جنس‌های دم‌فزیان با پارامترهای فیزیکی و شیمیایی

۴- جمع‌بندی

به دلیل تنوع بسیار زیاد، اندازه بسیار کوچک و سختی پژوهش‌های مرتبط با دم‌فزیان مطالعات کمی در سطح جهان روی آن‌ها انجام شده است. مطالعه حاضر برای اولین بار حساسیت جنس‌های دم‌فزیان را به فلزات سنگین و پارامترهای محیطی در خاک‌های آغشته به فاضلاب‌های شهری و صنعتی مورد بررسی قرار داد نتایج نشان داد خاک‌هایی که میزان غلظت کربن کل آن‌ها زیاد است دارای تعداد جنس بیشتری از دم‌فزیان هستند و خاک‌هایی که آلوده به فلزات سنگین آهن و کروم می‌باشند تعداد جنس کمتری دارند. تعداد جنس با این فلزات همبستگی منفی نشان داد. با توجه به اهمیت دم‌فزیان در حفاظت از تنوع زیستی و نقش آن‌ها به عنوان یک شاخص زیستی در بررسی کیفیت محیط زیست پیشنهاد می‌گردد مطالعات بیشتری در رابطه با بوم‌سم‌شناسی جمعیت‌های مختلف این بندپایان صورت گیرد.

کتابنامه

- اسماعیلیان، حسین؛ تفضلی، سید محمد؛ قاسمی‌زاده آزر می، سید علیرضا؛ خاتمی، فرزانه؛ رجب‌زاده، ناهید؛ ۱۳۹۹.
 واگذاری بهره‌برداری بلندمدت و نتیجه محور تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به بخش خصوصی مطالعه موردی
 تصفیه‌خانه‌های فاضلاب خین‌عرب و التیمور مشهد. هشتمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب ایران، مشهد،
<https://civilica.com/doc/1171954>
 جعفری، فاطمه؛ مهرنادر، حمید؛ حافظی مقدس، ناصر؛ قزی، اعظم؛ ۱۳۹۴. بررسی تغییرات جانبی رودخانه کشف‌رود.

- کنگره بین‌المللی تخصصی علوم و زمین، ۳۴، SID. <https://sid.ir/paper/840405/fa>.
- حسینی بهلولی، مهدیه؛ قشلاقی، افشین؛ محمودی، محمدحسین؛ ۱۳۹۶. بررسی غلظت فلزات سنگین در خاک‌های آبیاری شده با فاضلاب تصفیه نشده در منطقه التیمور مشهد. پنجمین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، <https://civilica.com/doc/760154>.
- صابری کهرودی، ه؛ گلچین، ا؛ و علمداری، پ؛ ۲۰۲۰. ارزیابی آلودگی خاک‌های اطراف کارخانه آلومینیوم‌سازی اراک به عناصر آلومینیوم، آهن، منگنز و سرب. فصلنامه علوم و تکنولوژی محیطزیست، ۲۲(۲)، ۳۱۵-۳۳۲. <https://doi.rg/10.22034/jest.2020.9340>
- علیزاده اقدم، محمدباقر؛ بنی‌فاطمه، حسین؛ عباس‌زاده، محمد؛ سلطانی بهرام، سعید؛ ۲۰۱۷. شهروندی بوم‌شناختی و هوش معنوی (مورد مطالعه: شهروندان شهر تبریز). جامعه‌شناسی کاربردی، ۲۸(۳)، ۷۹-۹۸. <https://doi.org/10.22108/jas.2017.21715>
- کهراریان، مرتضی؛ ۱۳۹۲. جمع‌آوری و شناسایی حشرات بی‌بال راسته Collembola در استان کرمانشاه (شهرستان‌های کرمانشاه، صحنه، هرسین). گزارش نهایی طرح پژوهشی. دانشگاه آزاد اسلامی کرمانشاه.
- مهرآوران، بابک؛ انصاری، حسین؛ بهشتی، علی‌اصغر؛ اسماعیلی، کاظم؛ ۱۳۹۴. بررسی امکان استفاده از پساب تصفیه شده در آبیاری با توجه به اثرات زیست‌محیطی آن (مطالعه موردی پساب خروجی تصفیه‌خانه پرکندآباد مشهد). مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۹(۳)، ۴۴۰-۴۴۷. SID. <https://sid.ir/paper/131692/fa>.

- Alengebawy, A., Abdelkhalek, S. T., Qureshi, S. R., & Wang, M.-Q., 2021. Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: Ecological risks and human health implications. *Toxics*, 9(3), 42, <https://doi.org/10.3390/toxics9030042>.
- Amanze, C., Zheng, X., Man, M., Yu, Z., Ai, C., Wu, X., Xiao, S., Xia, M., Yu, R., & Wu, X., 2022. Recovery of heavy metals from industrial wastewater using bioelectrochemical system inoculated with novel Castellaniella species. *Environmental Research*, 205, 112467, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112467>.
- Arbea, J., & Kahrarian, M., 2015. The genus Folsomides Stach (Collembola, Isotomidae) in Kermanshah Province (W Iran) with the description of two new species. *Zootaxa*, 3925(2), 281-290, <http://dx.doi.org/10.11646/zootaxa.3925.2.9>.
- Ashraf, S., Ali, Q., Zahir, Z. A., Ashraf, S., & Asghar, H. N., 2019. Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 174, 714-727, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.068>
- Austruy, A., Laplanche, C., Mombo, S., Dumat, C., Deola, F., & Gers, C., 2016. Ecological changes in historically polluted soils: Metal (loid) bioaccumulation in microarthropods and their impact on community structure. *Geoderma*, 271, 181-190, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.02.011>
- Baratzadeh Poustchi, F., Yazdi, F. T., Heidari, A., & Moosavi, Z., 2020. Evaluation of chromium accumulation and resulting histopathological changes in Libyan jirds (Mammals, Rodentia), affected by effluent from Ghazghan leather industrial town, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(31), 39343-39353, <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09801-1>.
- Bretfeld, G., 1999. Synopses on palaeartic collembola: symphypleona. *Abhandlungen Und Berichte Des Naturkundemuseums Gorlitz*, 71, 1-318.

- <https://cir.nii.ac.jp/crid/1571980074212653696>.
- Calabrese, E. J., & Baldwin, L. A., 2003. Toxicology rethinks its central belief. *Nature*, 421(6924), 691–692, <https://doi.org/10.1038/421691a>.
- Coulibaly, S. F. M., Coudrain, V., Hedde, M., Brunet, N., Mary, B., Recous, S., & Chauvat, M., 2017. Effect of different crop management practices on soil Collembola assemblages: A 4-year follow-up. *Applied Soil Ecology*, 119, 354–366. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.013>.
- Crouau, Y., & Cazes, L., 2005. Unexpected reduction in reproduction of collembola exposed to an arsenic-contaminated soil. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 24(7), 1716–1720, <https://doi.org/10.1897/04-265R.1>.
- Errington, I., King, C. K., Houlahan, S., George, S. C., Michie, A., & Hose, G. C., 2018. The influence of vegetation and soil properties on springtail communities in a diesel-contaminated soil. *Science of the Total Environment*, 619, 1098–1104. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.186>.
- Farias, D. R., Hurd, C. L., Eriksen, R. S., & Macleod, C. K., 2018. Macrophytes as bioindicators of heavy metal pollution in estuarine and coastal environments. *Marine Pollution Bulletin*, 128, 175–184, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.01.023>.
- Fiera, C., 2009. Biodiversity of Collembola in urban soils and their use as bioindicators for pollution. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 44, 868–873, <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000800010>.
- Fjellberg, A., 2007. *The Collembola of Fennoscandia and Denmark, Part II: Entomobryomorpha and Symphypleona*. Brill. [https://books.google.com/books?id=28ewCQAAQBAJ&lpg=PA1&ots=8cuWolrdDU&dq=Fjellberg%2C%20A.%20\(2007\).%20The%20Collembola%20of%20Fennoscandia%20and%20Denmark%2C%20Part%20II%3A%20Entomobryomorpha%20and%20Symphypleona.%20Brill.&lr&pg=PA1#v=onepage&q=Fjellberg,%20A.%20\(2007\).%20The%20Collembola%20of%20Fennoscandia%20and%20Denmark,%20Part%20II:%20Entomobryomorpha%20and%20Symphypleona.%20Brill.&f=false](https://books.google.com/books?id=28ewCQAAQBAJ&lpg=PA1&ots=8cuWolrdDU&dq=Fjellberg%2C%20A.%20(2007).%20The%20Collembola%20of%20Fennoscandia%20and%20Denmark%2C%20Part%20II%3A%20Entomobryomorpha%20and%20Symphypleona.%20Brill.&lr&pg=PA1#v=onepage&q=Fjellberg,%20A.%20(2007).%20The%20Collembola%20of%20Fennoscandia%20and%20Denmark,%20Part%20II:%20Entomobryomorpha%20and%20Symphypleona.%20Brill.&f=false).
- Kuznetsova, N. A., 2009. Soil-dwelling Collembola in coniferous forests along the gradient of pollution with emissions from the Middle Ural Copper Smelter. *Russian Journal of Ecology*, 40(6), 415–423, <https://doi.org/10.1134/S106741360906006X>.
- Kwiatkowska-Malina, J., 2018. Functions of organic matter in polluted soils: The effect of organic amendments on phytoavailability of heavy metals. *Applied Soil Ecology*, 123, 542–545, <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.021>.
- Li, S., Li, J., Li, Z., Ke, X., Wu, L., & Christie, P., 2021. Toxic effects of norfloxacin in soil on fed and unfed *Folsomia candida* (Isotomidae: Collembola) and on gut and soil microbiota. *Science of The Total Environment*, 788, 147793, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147793>.
- Liu, M., Xu, J., Krogh, P. H., Song, J., Wu, L., Luo, Y., & Ke, X., 2018. Assessment of toxicity of heavy metal-contaminated soils toward Collembola in the paddy fields supported by laboratory tests. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(17), 16969–16978, <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1864-y>.
- Manickavasagam, S., Sudhan, C., & Aanand, S., 2019. Bioindicators in aquatic environment and their significance. *Journal of Aquaculture in the Tropics*, 34(1/2), 73–79, <http://doi.org/10.32381/JAT.2019.34.1-2.6>.
- Mirsal, I. A., 2008. *Soil pollution*. Springer, <https://doi.org/10.1007/978-3-540-70777-6>.
- Nursita, A. I., Singh, B., & Lees, E., 2005. The effects of cadmium, copper, lead, and zinc on the growth and reproduction of *Proisotoma minuta* Tullberg (Collembola). *Ecotoxicology and*

- Environmental Safety*, 60(3), 306–314, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2004.05.001>.
- Park, J., Lee, S., Lee, E., Noh, H., Seo, Y., Lim, H., Shin, H., Lee, I., Jung, H., & Na, T., 2019. Probabilistic ecological risk assessment of heavy metals using the sensitivity of resident organisms in four Korean rivers. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 183, 109483, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109483>
- Potapov, M., 2002. Synopses on Palaearctic Collembola. Volume 3, Isotomidae. In: Dunger, W. (Ed). *Staatliches Museum Fur Naturkunde Gorlitz*, https://www.researchgate.net/publication/284409981_Synopses_on_Palaearctic_Collembola_Isotomidae.
- Rekhate, C. V., & Srivastava, J. K., 2021. Effectiveness of O₃/Fe²⁺/H₂O₂ process for detoxification of heavy metals in municipal wastewater by using RSM. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 165, 108442, <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108442>.
- Rocheftort, S., Therrien, F., Shetlar, D. J., & Brodeur, J., 2006. Species diversity and seasonal abundance of Collembola in turfgrass ecosystems of North America. *Pedobiologia*, 50(1), 61–68, <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2005.10.007>.
- Santamaría, J. M., Moraza, M. L., Elustondo, D., Baquero, E., Jordana, R., Lasheras, E., Bermejo, R., & Ariño, A. H., 2012. Diversity of Acari and Collembola along a pollution gradient in soils of a pre-Pyrenean forest ecosystem. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 11(6), <https://dadun.unav.edu/handle/10171/27602>.
- Santorufu, L., Van Gestel, C. A. M., Rocco, A., & Maisto, G., 2012. Soil invertebrates as bioindicators of urban soil quality. *Environmental Pollution*, 161, 57–63, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.09.042>.
- Sharma, N., Sodhi, K. K., Kumar, M., & Singh, D. K., 2021. Heavy metal pollution: Insights into chromium eco-toxicity and recent advancement in its remediation. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 15, 100388, <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100388>.
- Sharma, P., Pandey, A. K., Kim, S.-H., Singh, S. P., Chaturvedi, P., & Varjani, S., 2021. Critical review on microbial community during in-situ bioremediation of heavy metals from industrial wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, 101826, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101826>.
- Sheikh, M. M., Rezaei, M. R., & Nasserri, M. A., 2013. Heavy metals (Hg, Cr and Pb) concentrations in water and sediment of Kashaf Rood River. *Toxicology and Environmental Health Sciences*, 5(2), 65–70, <https://doi.org/10.1007/s13530-013-0159-4>.
- Sławski, M., & Sławska, M., 2019. Seven decades of spontaneous forest regeneration after large-scale clear-cutting in Białowieża forest do not ensure the complete recovery of collembolan assemblages. *Forests*, 10(11), 948, <https://doi.org/10.3390/f10110948>.
- Sterzyńska, M., Nicia, P., Zadrożny, P., Fiera, C., Shrubovych, J., & Ulrich, W., 2018. Urban springtail species richness decreases with increasing air pollution. *Ecological Indicators*, 94, 328–335, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.063>.
- Tang, J., Zhang, J., Ren, L., Zhou, Y., Gao, J., Luo, L., Yang, Y., Peng, Q., Huang, H., & Chen, A., 2019. Diagnosis of soil contamination using microbiological indices: A review on heavy metal pollution. *Journal of Environmental Management*, 242, 121–130, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.061>.
- Thibaud, J.-M., 2004. Synopses on palaearctic collembola: hypogastruridae. *Abhandlungen Und Berichte Des Naturkundemuseums Gorlitz*, 75, 1–287, https://cir.nii.ac.jp/crid/1572543025726348544# Citations_container.
- Tidona, S., Van Gestel, C. A. M., Morais, P. V., & Sousa, J. P., 2009. The use of Collembola

- avoidance tests to characterize sewage sludges as soil amendments. *Chemosphere*, 77(11), 1526–1533, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.09.056>.
- Wang, Y., Slotsbo, S., & Holmstrup, M., 2022. Soil dwelling springtails are resilient to extreme drought in soil, but their reproduction is highly sensitive to small decreases in soil water potential. *Geoderma*, 421, 115913, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115913>.
- Winkler, D., Bidló, A., Bolodár-Varga, B., Erdő, Á., & Horváth, A., 2018. Long-term ecological effects of the red mud disaster in Hungary: Regeneration of red mud flooded areas in a contaminated industrial region. *Science of The Total Environment*, 644, 1292–1303, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.059>.
- Xu, J., Ke, X., Krogh, P. H., Wang, Y., Luo, Y., & Song, J., 2009. Evaluation of growth and reproduction as indicators of soil metal toxicity to the Collembolan, *Sinella curviseta*. *Insect Science*, 16(1), 57–63. [file:///C:/Users/Pardis/32623410/Documents/mendpay/j.1744-7917.2009.00254.x\(1\).pdf](file:///C:/Users/Pardis/32623410/Documents/mendpay/j.1744-7917.2009.00254.x(1).pdf), <https://doi.org/10.1111/j.1744-7917.2009.00254.x>.
- Yan, N., & Marschner, P., 2013. Response of soil respiration and microbial biomass to changing EC in saline soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 65, 322–328, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.06.008>.
- Ying, D., Zhu, L. I., Xin, K. E., Longhua, W. U., & Shengpeng, Z. U. O., 2021. Toxicity of lead pollution to the collembolan *Folsomia candida* in Ferri-Udic Cambosols. *Pedosphere*, 31(4), 627–637, [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(21\)60008-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60008-5).
- Zhang, H., Zhang, F., Song, J., Tan, M. L., & Johnson, V. C., 2021. Pollutant source, ecological and human health risks assessment of heavy metals in soils from coal mining areas in Xinjiang, China. *Environmental Research*, 202, 111702, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111702>.