University of Tehran Press

Journal of Natural Environment

Online ISSN: 2423-7817

Homepage: https://jne.ut.ac.ir/

Investigation of the effect of dust on the bioaccumulation of mercury and arsenic in Indian Gerbil (*Tatera indica*) and Persian Jird (*Meriones persicus*) in Sistan

Fatemeh Molashahi[1] | Saeed Mohammadi[2]✉ | Mohsen Shariari Moghadam[3] | Atefeh Chamani[4] | Somayeh Bagheri[5,6]

1. Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: fatemeh.m6654@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: smohammadi@uoz.ac.ir
3. Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: mohsen.shahriari@uoz.ac.ir
4. Department of Environmental Science and Engineering. Isf. C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran. E-mail: atefeh.chamani@iau.ac.ir
5. Department of Biostatistics, Zabol University of Medical Sciences, Zabol. Iran. E-mail: somayeh.bagheri29@gmail.com
6. Zabol Medicinal Plants Research Center, Zabol University of Medical Sciences, Zabol, Iran.

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 14 June 2026

Received in revised form 2 August 2026

Accepted 3 September 2026

Keywords:

Bioaccumulation,

Biomonitoring,

Dust,

Heavy metals,

Wildlife.

ABSTRACT

The Sistan Basin is one of the world's major dust sources owing to the "120-day winds" and the desiccation of the Hamoun Wetlands. Atmospheric dust in this region carries toxic elements such as mercury (Hg) and arsenic (As). This study aimed to evaluate the impact of dust on the bioaccumulation of Hg and As in the hair of two native rodent species — the Indian Gerbil (*Tatera indica*) and the Persian Jird (*Meriones persicus*) — as bioindicators of environmental pollution in the Sistan region. Sampling was conducted in June and July 2025 across three sites with different land uses (agricultural, residential, and natural). A total of 27 individuals were captured. Hair samples underwent a three-step washing protocol to distinguish internal from external contamination, and were analyzed using inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). Data analysis was performed using one-way ANOVA and independent t-tests in SPSS software. The results showed that the mean Hg concentration in the hair of M. persicus (1.76 µg/g) was significantly higher than that in T. indica (0.96 µg/g) (P<0.05). However, no significant difference in As concentration was observed between the two species. The highest concentrations of both elements were recorded at the site nearest to both dust sources and agricultural lands (S1) (As: 4.18 µg/g and Hg: 2.50 µg/g), which differed significantly from the other sites (P<0.05). Furthermore, sex had no significant effect on accumulation levels in either species. The findings suggest that M. persicus exhibits a greater potential for Hg accumulation, owing to its omnivorous diet and greater soil contact. High As levels in areas near dust sources highlight the key role of dust storms and agricultural activities in transferring this element into the food chain. Since the observed concentrations at some sites are comparable to those in mining areas of Iran, continuous monitoring of regional wildlife is essential to prevent the transfer of pollutants to higher trophic levels.

Cite this article: Molashahi, F., Mohammadi, S., Shariari Moghadam, M., Chamani, A., & Bagheri, S. (2026). Investigation of the effect of dust on the bioaccumulation of mercury and arsenic in Indian Gerbil (*Tatera indica*) and Persian Jird (*Meriones persicus*) in Sistan. *Journal of Natural Environment*, *79* (4), 625-638. DOI: http//doi.org/10.22059/jne.2026.416542.2920

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

Introduction

Heavy metal pollution constitutes one of the most severe environmental challenges of recent decades, with mercury (Hg) and arsenic (As) ranking among the most hazardous due to their persistence, bioaccumulative potential, and toxicity across trophic levels. The Sistan Basin in eastern Iran ranks among the world's most severe dust-generating regions. The '120-day wind,' a dominant synoptic feature blowing from the north-northwest at speeds typically exceeding 20–30 m/s from mid-May to the end of September, combined with the near-complete desiccation of the Hamoun Wetlands due to recurring droughts and land-use changes, generates more than 160 dust days per year. Rodents are widely used as bioindicators of local environmental contamination owing to their high abundance, broad habitat coverage, diverse diets, short lifespans, and capacity to accumulate heavy metals in body tissues. Hair is a particularly valuable non-invasive biomatrix, reflecting both endogenous contamination (via blood-to-hair follicle transfer during growth) and exogenous contamination (surface deposition of dust particles). The Persian Jird *(Meriones persicus*) and the Indian Gerbil (*Tatera indica*) are the two dominant rodent species in the Sistan region, differing markedly in dietary ecology and thus providing an informative contrast for studying metal transfer dynamics. Despite Sistan being internationally recognized as a major dust hotspot, no comprehensive study had previously investigated the effect of dust on Hg and As bioaccumulation in its native wildlife.

Material and Methods

Sampling was conducted in June and July 2025 at three stations representing contrasting land uses: S1 (pristine natural habitat adjacent to the dry lakebed, minimum 5 km from other stations), S2 (agricultural-wheat and melon cultivation with chemical fertilizer and pesticide application), and S3 (peri-urban residential with moderate traffic). Live traps were deployed along three 100-m transects per station (30 traps per station, spaced 10 m apart), baited with peanuts, puffed snacks, and dates. Traps were set before dusk and checked at dawn. Species identification followed validated Iranian rodent keys. Dorsal nape and mid-back hair samples (200–250 µg) were collected and individuals were released at their capture site. A total of 27 individuals were captured (13 *T. indica*: 7 males, 6 females; 14 *M. persicus*: 7 males, 7 females). To separate exogenous from endogenous contamination, a three-step washing protocol was applied: (1) 0.5% Triton X-100 solution for 10 min (removal of surface organic contamination); (2) three successive rinses with deionized water; (3) dilute nitric acid for 5 min followed by a final deionized water rinse (removal of surface inorganic contamination). Samples were oven-dried at 40°C for 24 h. Hg and As concentrations were determined by ICP-OES (Inductively Coupled Plasma–Optical Emission Spectrometry); all results are expressed as µg/g dry weight (dw). Data normality was confirmed by the Shapiro-Wilk test (As: $p = 0.162$; Hg: $p = 0.200$). Inter-station comparisons were made with one-way ANOVA followed by Tukey's post hoc test; inter-species and inter-sex comparisons used independent-samples t-tests. Statistical significance was set at $P<0.05$; analyses were performed in SPSS v.26.

Results

One-way ANOVA revealed significant differences in both As and Hg concentrations across the three sampling stations ($P<0.05$). Tukey's post hoc test showed that As concentration at S1 (4.06 µg/g dw) was significantly higher than at S2 (2.48 µg/g dw) and S3 (1.53 µg/g dw), establishing a clear declining gradient from the agricultural/dust-source station to the residential station. Mean Hg at S1 (2.09 µg/g dw) was approximately ten-fold higher than at S3 (0.22 µg/g dw; $P< 0.01$). Regarding inter-species differences, mean Hg in *M. persicus* hair (1.76 µg/g dw) was significantly greater than in *T. indica* (0.96 µg/g dw; $P<0.05$). No significant inter-species difference was detected for As (M. persicus: 2.95 µg/g dw vs. *T. indica*: 2.88 µg/g dw; $p = 0.93$). The highest As value recorded was 7.36 µg/g dw in a female *T. indica*. Peak concentrations of both elements across both species were recorded at S1; *M. persicus* exhibited higher concentrations than *T. indica* at this station (Hg: 2.47 vs. 1.64 µg/g dw; As: 4.18 vs. 3.91 µg/g dw). Sex had no significant effect on As ($P= 0.70$) or Hg ($P= 0.40$) accumulation in either species, although females showed marginally higher means than males in both species.

Discussion and Conclusion

This study documents, for the first time, a significant link between chronic dust exposure in Sistan and Hg/As bioaccumulation in native wildlife. The significant station effect and the clear spatial gradient in both elements—highest near the agricultural land and dust sources, lowest at the residential site—demonstrate that land use and proximity to dust emission centres are key determinants of metal burden in rodents. The higher Hg accumulation in *M. persicus* compared to *T. indica* is consistent with its omnivorous-insectivorous diet: by consuming soil-dwelling invertebrates that absorb Hg from contaminated soils, the Persian Jird occupies a slightly higher trophic position. The similar As concentrations in both species reflect their shared dietary exposure pathway (contaminated plant material and soil) regardless of dietary guild. Comparison with existing data for *M. persicus* from the Darreh Zereshk copper mine (As: 1.82–5.2 µg/g dw; Khazaee et al., 2022) reveals that As exposure at the agricultural station (S1) in Sistan is comparable to a mining environment—underscoring the severity of contamination driven by chronic dust storms and the use of arsenic-containing agrochemicals. Although the maximum Hg value recorded (≈ 2.5 µg/g dw) remains below direct toxicity thresholds for small mammals, it approaches reference guidance values, indicating genuine cause for concern. Given that both study species are important prey for raptors, foxes, and snakes, biomagnification of these contaminants to higher trophic levels is plausible. This research fills a critical knowledge gap in the ecotoxicology of the Sistan region by demonstrating that endemic rodent species function as effective sentinels of dust-mediated heavy metal pollution. Continuous wildlife monitoring is essential to prevent further trophic transfer of contaminants. Future studies with larger sample sizes should explore age- and sex-specific accumulation patterns and extend biomonitoring to internal organs such as liver and kidney.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

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

CRediT authorship contribution statement

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

We thank the anonymous reviewers for their careful reading of our manuscript and their insightful comments and suggestions. The authors would like to thank Dr Hossein Barahoei, Farzad Keikha and Dr Mehdi Mehmandoust for their help during fieldworks and also We would like to express our thanks to Dr Hasehm Khandan Barani for the experimental process.

محیط زیست طبیعی

انتشارات دانشگاه تهران

شاپای الکترونیکی: ۷۸۱۷-۲۴۲۳

Homepage: https://jne.ut.ac.ir/

بررسی اثر گردوغبار بر انباشت زیستی جیوه و آرسنیک در جربیل هندی و جرد ایرانی در سیستان

فاطمه ملاشاهی[۱] | سعید محمدی[۲]✉ | محسن شهریاری‌مقدم[۳] | عاطفه چمنی[۴] | سمیه باقری[۵،۶]

۱. گروه محیط‌زیست، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: fatemehm6654@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه محیط‌زیست، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: smohammadi@uoz.ac.ir

۳. گروه محیط‌زیست، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: mohsen.shahriari@uoz.ac.ir

۴. گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران. رایانامه: atefehchamani@iau.ac.ir

۵. گروه آمار زیستی، دانشکدهٔ بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی زابل، زابل، ایران. رایانامه: somayeh.bagheri29@gmail.com

۶. مرکز تحقیقات گیاهان دارویی دانشگاه علوم پزشکی زابل، زابل، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۲

کلیدواژه‌ها:

آلودگی،

سمیت،

حیات وحش،

انباشت زیستی،

گردوغبار.

چکیده

جوندگان به‌عنوان پرجمعیت‌ترین راسته از پستانداران، به‌دلیل پراکنش گسترده در بسیاری از زیستگاه‌ها و تماس مستقیم با خاک و آب آلوده به‌عنوان شاخص زیستی مناسبی برای پایش آلودگی محیطی استفاده می‌شوند. حوضهٔ سیستان به‌دلیل پدیدهٔ بادهای ۱۲۰ روزه و خشک‌شدگی تالاب‌های هامون، یکی از کانون‌های اصلی گردوغبار در جهان است که ذرات معلق آن حامل عناصر سمی نظیر جیوه و آرسنیک هستند. این مطالعه با هدف ارزیابی اثر گردوغبار بر انباشت زیستی جیوه و آرسنیک در موی دو گونهٔ جونده، جربیل هندی (*Tatera indica*) و جرد ایرانی (*Meriones persicus*)، به‌عنوان شاخص‌های زیستی آلودگی محیطی در منطقهٔ سیستان انجام شد. نمونه‌برداری در خرداد و تیر ۱۴۰۴ از سه ایستگاه با کاربری‌های مختلف زیستگاه طبیعی، کشاورزی مسکونی انجام گرفت. در مجموع ۲۷ نمونه از دو گونه صید و نمونه‌های موی آنها پس از شستشوی سه‌مرحله‌ای به روش ICP-OES آنالیز شدند. تحلیل داده‌ها با استفاده از آزمون‌های آنالیز واریانس یک‌طرفه و تی مستقل در نرم‌افزار SPSS انجام شد. نتایج نشان داد میانگین غلظت جیوه در موی جرد ایرانی (۱/۷۶ میکروگرم بر گرم) به‌طور معنی‌داری بیشتر از جربیل هندی (۰/۹۶ میکروگرم بر گرم) بود ($P<0/05$). با این حال، تفاوت معنی‌داری در غلظت آرسنیک بین دو گونه مشاهده نشد. بیشترین غلظت هر دو عنصر در ایستگاه نزدیک به کانون‌های گردوغبار واقع در زیستگاه طبیعی اندازه‌گیری شد که تفاوت معنی‌داری با ایستگاه‌های دیگر داشت ($P<0/05$). همچنین، جنسیت تأثیر معنی‌داری بر میزان انباشت عناصر در هیچ‌یک از گونه‌ها نداشت. یافته‌ها حاکی از آن است که جرد ایرانی به‌دلیل رژیم غذایی همه‌چیزخوار و تماس بیشتر با خاک، پتانسیل بالاتری برای تجمع جیوه نشان می‌دهد. سطوح بالای آرسنیک در مناطق نزدیک به کانون‌های گردوغبار نشان‌دهندهٔ نقش کلیدی ریزگردها و فعالیت‌های کشاورزی در انتقال این عنصر به زنجیرهٔ غذایی است. با توجه به اینکه غلظت‌های مشاهده شده در برخی ایستگاه‌ها با مناطق معدنی کشور برابری می‌کند، پایش مستمر حیات‌وحش منطقه به‌منظور جلوگیری از انتقال آلودگی به سطوح بالاتر زنجیرهٔ غذایی ضروری است.

استناد: ملاشاهی، فاطمه؛ محمدی، سعید؛ شهریاری‌مقدم، محسن؛ چمنی، عاطفه؛ و باقری، سمیه (۱۴۰۵). بررسی اثر گردوغبار بر انباشت زیستی جیوه و آرسنیک در جربیل هندی و جرد ایرانی در سیستان. *محیط زیست طبیعی*، ۷۹ (۴)، ۶۳۸-۶۲۵.

DOI: http//doi.org/10.22059/jne.2026.416542.2920

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

مقدمه

آلودگی به فلزات سنگین یکی از جدی‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی در دهه‌های اخیر به‌شمار می‌رود. گردوغبار اتمسفری به‌عنوان یک ناقل مهم برای انتقال عناصر سمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک شناخته می‌شود. ذرات معلق (PM10) و (PM2.5) می‌توانند مقادیر قابل‌توجهی از جیوه، آرسنیک، کادمیم و سایر فلزات سنگین را حمل کنند و از طریق رسوب خشک و تر وارد اکوسیستم‌های زمینی شوند (Badeenezhad *et al*., 2023). حوضهٔ سیستان در شرق ایران یکی از بادخیزترین و گردوغبارخیزترین مناطق خشک جهان به‌شمار می‌رود. باد ۱۲۰ روزه، که یک پدیدهٔ اقلیمی غالب در این منطقه است، از اواسط ماه مِی تا پایان سپتامبر با سرعت‌هایی معمولاً بیش از ۳۰–۲۰ متر بر ثانیه از سمت شمال–شمال‌غرب می‌وزد (Kaskaoutis *et al*., 2016). این باد با ایجاد فرسایش شدید بادی از بستر خشک‌شده تالاب‌های هامون که به‌دلیل خشکسالی‌های مکرر و تغییرات کاربری اراضی تقریباً به‌طور کامل دچار خشک‌شدگی شده‌اند، موجب وقوع بیش از ۱۶۰ روز گردوغبار در سال می‌شود (Rashki *et al*., 2012; Darvishi Boloorani *et al*., 2022). رسوبات ریز دانه‌ای که در بستر دریاچهٔ هامون طی سده‌های متمادی توسط رودخانهٔ هیرمند انباشته شده‌اند، سرشار از ترکیبات معدنی متنوع بوده و هنگامی که توسط باد برخاسته می‌شوند، بخش‌های قابل‌توجهی از عناصر سمی از جمله آرسنیک، کروم، روی و منگنز را به اتمسفر می‌افزایند (Dahmardeh Behrooz *et al*., 2017; Asvad *et al*., 2023). مطالعات شیمیایی بر روی ذرات معلق سیستان حاکی از آن است که میانگین غلظت آرسنیک در ذرات معلق کل حدود ۲۸/۶۹ میکروگرم بر مترمکعب بوده و شاخص غنی‌شدگی برای این عنصر در حد متوسط (۲/۸) ارزیابی شده است که بیانگر دخالت همزمان منابع طبیعی (زمین‌زاد) و انسان‌زاد در آلودگی به آرسنیک در این منطقه است (Rashki *et al*., 2013; Asvad *et al*., 2023). همچنین وجود کلریدها و سدیم به نسبت قابل‌توجه در نمونه‌های گردوغبار به حضور ذرات نمکی ناشی از خشک‌شدگی دریاچه‌های هامون اشاره دارد که ترکیب شیمیایی این گردوغبار را از سایر کانون‌های ایران متمایز می‌سازد (Dahmardeh Behrooz *et al*., 2017). مطالعات متعددی نشان داده‌اند که طوفان‌های گردوغبار می‌توانند غلظت فلزات سمی را در هوای آزاد تا چندین برابر افزایش دهند و این عناصر پس از رسوب بر سطح خاک، پوشش گیاهی و منابع آبی، از طریق تغذیه و تماس مستقیم وارد بدن جانوران می‌شوند (Hu et al., 2011; Soleimani-Sardo *et al*., 2023). از جمله این عناصر، جیوه و آرسنیک از سمی‌ترین و پایدارترین عناصر معدنی در اکوسیستم‌های طبیعی هستند که به‌دلیل ماهیت زیست‌انباشتی در زنجیره‌های غذایی، تهدیدی جدی برای سلامت انسان و تنوع زیستی محسوب می‌شوند (Wren, 1986; Talmage and Walton, 1991). این دو عنصر در طیف گسترده‌ای از محیط‌های آلوده شناسایی شده‌اند و مطالعات اکوتوکسیکولوژیک نشان داده‌اند که حتی در غلظت‌های پایین می‌توانند اختلالات عمیقی در فیزیولوژی، رفتار و تولیدمثل جانوران ایجاد کنند (Sánchez-Chardi *et al*., 2007 a,b). پستانداران کوچک، به‌ویژه جوندگان، به‌عنوان گونه‌های شاخص زیستی در پایش آلودگی‌های محیطی به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. این جانوران به‌دلیل رژیم غذایی متنوع، عمر کوتاه، فراوانی بالا و انباشت مناسب عناصر سنگین در بافت‌های مختلف بدن، نمایانگر خوبی از آلودگی محیطی در سطح محلی هستند (Talmage and Walton, 1991; Sanchez-Chardi *et al*., 2009). موی بدن جوندگان به‌عنوان یک ماتریس زیستی غیرتهاجمی ارزشمند برای پایش فلزات سنگین معرفی شده است؛ زیرا علاوه بر انعکاس بار آلودگی درونی ناشی از تجمع خون و انتقال به پیاز مو در طی رشد، می‌تواند آلودگی برونی را از طریق جذب سطحی ذرات گردوغبار روی ساختار کوتیکول مو نیز نشان دهد (Sobanska, 2005; Dahmardeh Behrooz and Poma, 2021). مطالعات نشان داده‌اند که در پستانداران کوچک، غلظت جیوه کل در مو اغلب بیشتر از کبد است و این بافت می‌تواند تجمع مزمن جیوه آلی (متیل جیوه) و معدنی را بازتاب دهد (Wren, 1986; Pérez-Álvarez *et al*., 2024). در مناطق گردوغبارخیز، رسوب مستقیم ذرات حاوی جیوه بر سطح موی جانوران می‌تواند بخشی از سیگنال اندازه‌گیری‌شده را به‌خود اختصاص دهد (Boev et al., 2020). مقایسهٔ میان‌گونه‌ای انباشت عناصر سمی در جوندگان هم‌زیستگاه می‌تواند اطلاعات ارزشمندی دربارهٔ تفاوت‌های فیزیولوژیک در جذب، توزیع بافتی و دفع عناصر سمی ارائه دهد. تفاوت در رژیم غذایی، رفتار جستجوی غذا، عادات زیست‌شناختی و مکانیسم‌های سم‌زدایی می‌تواند موجب تفاوت معنی‌دار در سطح انباشت عناصر سنگین بین گونه‌های مختلف شود (Komarnicki, 2000; Tovar-Sánchez *et al*., 2012). این مقایسه به‌ویژه در گونه‌هایی که زیستگاه مشترک دارند اما از نظر تاکسونومیک و اکولوژیک متفاوتند، ابزار مفیدی برای درک پویایی آلاینده‌ها در اکوسیستم‌های شدیداً گردوغبارخیز به شمار می‌رود.

جرد ایرانی (*Meriones persicus*) یکی از گونه‌های غالب جوندگان در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران است که زیستگاه‌های متنوعی از دشت‌های سنگی تا دامنه‌های کوهستانی را اشغال می‌کند و به‌خوبی با شرایط سخت اقلیمی سیستان نیز سازگار شده است (Mohammadi *et al*., 2011). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که این گونه ظرفیت بالایی در تجمع فلزات سنگین نظیر آرسنیک، مس، آهن و کروم در بافت‌های مختلف بدن دارد و به‌همین دلیل به‌عنوان یک شاخص زیستی مناسب برای پایش آلودگی‌های فلزی معرفی شده است (Okati and Rezaee, 2013; Khazaee *et al*., 2022). جربیل هندی (*Tatera indica*) گونه‌ای است که زیستگاه‌های خشک و نیمه‌خشک با بستر لومی و شنی را ترجیح می‌دهد و گسترهٔ جغرافیایی از شبه‌جزیره عربستان تا آسیای جنوبی دارد (Mohammadi *et al*., 2014). رژیم غذایی گیاه‌خوار—همه‌چیزخوار این گونه، آن را در معرض آلودگی فلزی از طریق گیاهان آلوده به رسوب گردوغبار، خاک و آب‌های آلوده قرار می‌دهد. علی‌رغم شناسایی و معرفی آلوده‌ترین کانون‌های گردوغبار جهان در منطقهٔ سیستان (Jahanshahi *et al*., 2021)، تاکنون مطالعه‌ای جامع و اختصاصی در خصوص اثر این پدیده بر انباشت زیستی جیوه و آرسنیک در حیات وحش منطقه صورت نگرفته است. مطالعات موجود در ایران عمدتاً بر معادن، پساب‌های صنعتی یا تالاب‌ها متمرکز بوده‌اند و نقش گردوغبار به‌عنوان مسیر اصلی ورود این عناصر به بدن جانوران کمتر مورد توجه قرار گرفته است و تاکنون مطالعه‌ای اختصاصی در خصوص انباشت زیستی جیوه و آرسنیک در این دو گونه در ارتباط با گردوغبار انجام نشده است. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف اصلی ارزیابی اثر گردوغبار بر انباشت زیستی جیوه و آرسنیک در موی این دو گونه جوندهٔ بومی منطقه، طراحی و اجرا شده است. یافته‌های این مطالعه می‌تواند دیدگاه جدیدی در خصوص تأثیرات محیط‌زیستی طوفان‌های گردوغباری بر حیات¬وحش بومی این منطقه بحران‌زده ارائه دهد و در طراحی برنامه‌های پایش زیستی منطقه‌ای مثمر ثمر باشد.

روش‌شناسی پژوهش

منطقهٔ مطالعاتی و ایستگاه‌های نمونه‌برداری: این مطالعه در منطقهٔ سیستان یکی از بحرانی‌ترین کانون‌های گردوغبار در جهان است که به‌دلیل خشک‌شدگی دریاچه‌های هامون سالانه بیش از ۱۶۰ روز گردوغبار را تجربه می‌کند، انجام شد. سه ایستگاه نمونه‌برداری با فاصلهٔ حداقل ۵ کیلومتر از یکدیگر انتخاب شدند (جدول ۱).

جدول ۱- مشخصات سه ایستگاه نمونه‌برداری در منطقهٔ سیستان
Table 1. Data of three sampling stations in Sistan

ایستگاه	نوع زیستگاه	ویژگی اصلی
ایستگاه اول (کشاورزی)	زمین‌های کشاورزی	کشت گندم و جالیز، استفاده از کودهای شیمیایی و آفت‌کش
ایستگاه دوم (مسکونی)	حاشیهٔ روستایی–شهری	مناطق مسکونی با ترافیک متوسط و فضای سبز پراکنده
ایستگاه سوم (طبیعی)	زیستگاه طبیعی گونه	دشت خشک بکر، نزدیک بستر خشک هامون، دور از تأثیر مستقیم انسانی

نمونه‌برداری از جوندگان و آماده‌سازی: صید جوندگان با استفاده از تله‌های زنده‌گیر سنتی ساخت داخل (۱۳×۱۳×۳۰ سانتی متر) در خرداد و تیر ۱۴۰۴ انجام گرفت. ایستگاه‌ها به‌طور سیستماتیک–تصادفی انتخاب و در هر ایستگاه سه ترانسکت به طول هر کدام ۱۰۰ متر و با فاصلهٔ ۱۰ متر از یکدیگر (۳۰ تله) با فاصلهٔ ۱۰ متر بین تله‌ها مستقر شد (Mohammadi *et al*., 2014). تله‌ها با طعمه شامل بادام‌زمینی، پفک و خرما پیش از غروب آفتاب کار گذاشته شده و در طلوع صبح روز بعد کنترل و جمع‌آوری می‌شدند. در صورت صید تعداد نمونه، مختصات جغرافیایی، تاریخ صید ثبت و نمونه به آزمایشگاه منتقل می شد. شناسایی گونه‌ها با کلیدهای معتبر جوندگان ایران (Karami *et al*., 2015) انجام و سپس نمونه‌های موی ناحیهٔ پشت گردن و میان‌تنهٔ بخش پشتی به‌عنوان نمونهٔ اصلی برای هر فرد جمع‌آوری شد. مقدار ۲۵۰—۲۰۰ میلی‌گرم مو با قیچی استنلس استیل (ضدعفونی شده با اتانول ۷۰ درصد در هر مرتبه) چیده و در پوشال کاغذی تمیز قرار داده شد. نمونه‌ها تا انجام آنالیز آزمایشگاهی در دمای محیط و در محیط خشک نگهداری شدند. بعد از نمونه‌برداری گونه‌های صید شده در محل صید اولیه رهاسازی شدند. با توجه به اهمیت تفکیک آلودگی

برونی (رسوب ذرات گردوغبار بر سطح مو) از آلودگی درونی (جذب‌شده از طریق خون)، پروتکل شستشوی سه‌مرحله‌ای به‌کار گرفته شد؛ مرحلهٔ اول؛ شستشو با محلول تریتون (X100) به غلظت ۰/۵٪ به‌مدت ۱۰ دقیقه (حذف آلودگی آلی سطحی). مرحلهٔ دوم؛ شستشو با آب دیونیزهٔ سه بار متوالی و مرحلهٔ سوم؛ شستشو با اسید نیتریک رقیق‌شده به‌مدت ۵ دقیقه و سپس آبکشی مجدد با آب دیونیزه (حذف آلودگی معدنی سطحی). نمونه‌ها سپس در دمای ۴۰ درجهٔ سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت خشک شدند (Morton *et al*., 2002; Verrey *et al*., 2019). برای آماده‌سازی نمونه‌ها جهت اندازه‌گیری عناصر، مقدار ۰/۰۵ گرم از موهای خشک‌شده با استفاده از ترازوی تحلیلی توزین و به ظروف هضم منتقل شد. ابتدا ۳ میلی‌لیتر H_2O_2 به نمونه‌ها افزوده و در دمای ۵۵ درجهٔ سانتی‌گراد حرارت داده شد. سپس ۵ میلی‌لیتر HCl اضافه و نمونه‌ها به‌مدت ۴۵ دقیقه در دمای ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد قرار گرفتند. پس از آن، ۲۰ میلی‌لیتر HNO_3 2% افزوده و نمونه‌ها در دمای ۱۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد حرارت داده شدند. پس از سرد شدن، محلول‌ها از دو لایه کاغذ صافی عبور داده شده و با HNO_3 2% به حجم نهایی ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شدند. در نهایت غلظت آرسنیک و جیوه در محلول‌های حاصل با استفاده از دستگاه ICP-OES (Optima 8600, Perkin Elmer, Germany) اندازه‌گیری شد (Khazaee *et al*., 2022).

به‌منظور اطمینان از صحت و دقت اندازه‌گیری‌ها، اقدامات کنترل کیفیت و تضمین کیفیت (QA/QC) شامل استفاده از نمونه‌های شاهد (Blank) مادهٔ مرجع استاندارد گواهی‌شده (NRC Canada)، نمونه‌های تکراری و ارزیابی بازیابی انجام شد. حد تشخیص (LOD) و حد تعیین کمی (LOQ) برای As و Hg براساس روش استاندارد آزمایشگاه تعیین شد. مقادیر LOD برای As و Hg به‌ترتیب ۰/۰۰۵ و ۰/۰۰۲ میکروگرم بر گرم و مقادیر LOQ به‌ترتیب ۰/۰۱۵ و ۰/۰۰۶ میکروگرم بر گرم به‌دست آمد. درصد بازیابی برای As و Hg به‌ترتیب (۹۶/۸) و (۹۸/۲) درصد و مقادیر RSD حاصل از تکرارپذیری اندازه‌گیری‌ها به‌ترتیب ۳/۲ و ۲/۸ درصد بود. نتایج حاصل از CRM در محدودهٔ قابل قبول قرار داشت.

کالیبراسیون دستگاه با استفاده از محلول‌های استاندارد مناسب انجام شد و عملکرد دستگاه با استفاده از نمونه‌های کنترل کیفی در طول فرآیند آنالیز پایش شد. ضریب تعیین (R^2) منحنی کالیبراسیون برای As و Hg به‌ترتیب ۰/۹۹۹۷ و ۰/۹۹۹۹ بود. طول موج مورد استفاده برای اندازه‌گیری As و Hg به‌ترتیب ۱۸۸/۹۷۹ و ۱۹۴/۱۶۸ نانومتر بود و کنترل کیفیت و صحت کالیبراسیون برای Hg نیز در طول آنالیز انجام شد. تمامی نتایج پس از اعمال کنترل‌های کیفی و ضرایب لازم، براساس وزن خشک نمونه‌ها محاسبه و برحسب µg/g وزن خشک (dw) گزارش شدند.

تحلیل آماری: پیش از هر آزمون پارامتریک، جهت بررسی نرمال بودن توزیع داده‌های غلظت عناصر سمی آزمون Shapiro-Wilk استفاده گردید. برای مقایسهٔ غلظت جیوه و آرسنیک در مو بین سه ایستگاه آزمون آنالیز واریانس یک‌طرفه و پس آزمون توکی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین مقایسهٔ غلظت عناصر سمی بین دو گونهٔ *T. indica* و *M. persicus* و جنسیت با آزمون تی مستقل انجام شد. داده‌ها با نرم‌افزار SPSS v.26 تحلیل گردید. سطح معنی‌داری در تمام آزمون‌ها ۰/۰۵ ($P<0/05$) در نظر گرفته شد.

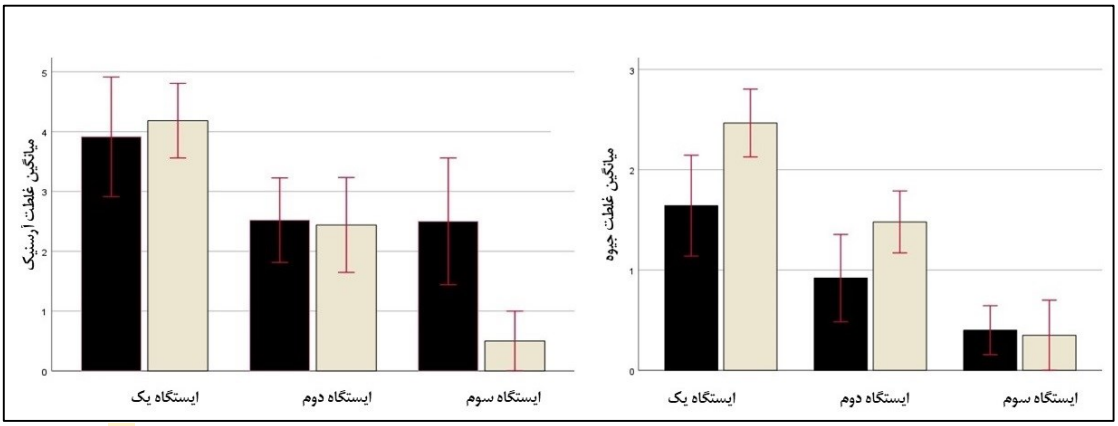
یافته‌های پژوهش

در مجموع ۲۷ نمونه از دو گونهٔ جرد ایرانی (۱۴ فرد) و جربیل هندی (۱۳ فرد) از سه ایستگاه نمونه‌برداری شد. توزیع نمونه‌ها بین ایستگاه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. بیشترین تعداد نمونه از ایستگاه یک (۱۱ نمونه) و کمترین از ایستگاه سه (۵ نمونه) به‌دست آمد (جدول ۱). جربیل هندی (۷ نر و ۷ ماده) و جرد ایرانی (۷ نر و ۶ ماده) صید شد. نتایج نشان داد که توزیع هر دو متغیر آرسنیک (sig=۰/۱۶۲) و جیوه (sig=۰/۲) با توزیع نرمال انطباق دارد ($P<0/05$). آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه تفاوت معنی‌داری بین سه ایستگاه نمونه‌برداری در سطح آلاینده‌های آرسنیک و جیوه نشان داد ($P<0/05$). یافته‌ها نشان می‌دهد غلظت آرسنیک در ایستگاه یک (۴/۰۶) به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از ایستگاه دو (۲/۴۸) و به‌خصوص ایستگاه سه (۱/۵۳) است ($P<0/05$، شکل ۱). این الگوی کاهشی بیانگر یک شیب تجمع واضح از ایستگاه اول تا سوم است. میانگین جیوه در ایستگاه اول (۲/۰۹) در مقایسه با ایستگاه سوم (۰/۲۲) تقریباً ۱۰ برابر بیشتر است ($P<0/01$) که نشان‌دهندهٔ تفاوت اساسی در میزان تجمع جیوه بین گروه‌های مختلف است. میانگین غلظت آرسنیک در هر دو گونه بسیار به هم نزدیک است. جرد ایرانی با میانگین ۲/۹۵ کمی بالاتر از جربیل

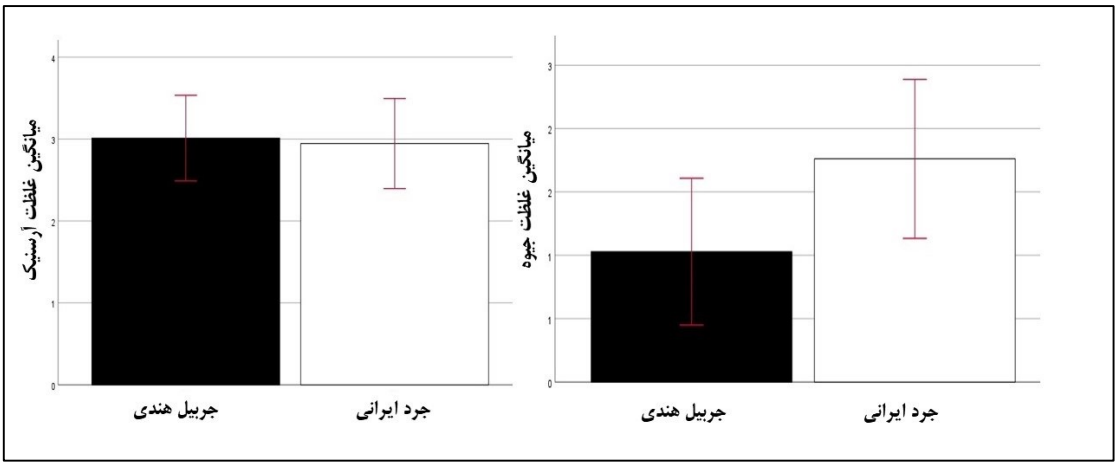
هندی با میانگین ۲/۸۸ قرار دارد($P<۰/۰۵$). در هر دو گونه، ماده‌ها میانگین غلظت آرسنیک بالاتری نسبت به نرها نشان می‌دهند. بیشترین میزان آرسنیک ثبت شده مربوط به یک نمونه جنس ماده از جربیل هندی با مقدار ۷/۳۶ است. میانگین جیوه در جرد ایرانی (۱/۷۶) به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از جربیل هندی (۰/۹۶) است. در سطح جنسیت نیز در گونهٔ جرد ایرانی، ماده‌ها با میانگین ۲/۰۵ غلظت بیشتری نسبت به نرها (۱/۵۱) دارند. در جربیل هندی نیز وضعیت مشابهی حاکم است و ماده‌ها میانگین غلظت ۱/۰۶ را در مقابل ۰/۸۶ نرها دارا هستند. بیشترین میزان میانگین غلظت هر دو عنصر در هر دو گونه در ایستگاه اول مشاهده شد که جرد ایرانی غلظت بیشتری نسبت به جربیل هندی داشت. تفاوت بین میانگین غلطت آرسنیک در جربیل هندی و جرد ایرانی معنی‌دار نبود. تفاوت بین میانگین غلظت جیوه بین دو گونه در جربیل هندی اندکی از سطح معنی‌داری ۰/۰۵ فراتر رفته اما اندازهٔ اثر P با توجه به حجم نمونهٔ محدود نشان‌دهندهٔ یک اثر بزرگ کافی برای تشخیص این تفاوت وجود نداشته است. تفاوت بین دو جنس نر و ماده در میانگین غلظت آرسنیک (P=۰/۷) و جیوه (P=۰/۴) نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین دو جنس مشاهده نشد (شکل ۲).

جدول ۱- میانگین (±انحراف معیار) غلظت عناصر در موی جربیل هندی و جرد ایرانی (میکروگرم بر گرم وزن خشک)
Table 2.Mean (±standard deviation) concentrations of elements in the hair of the Indian gerbil and the Persian jird (µg/g dry weight)

گونه	جربیل هندی					
سایت نمونه‌برداری	ایستگاه اول	ایستگاه دوم	ایستگاه سوم	ایستگاه اول	ایستگاه دوم	ایستگاه سوم
تعداد	5	5	4	5	5	4
عنصر		جیوه			آرسنیک	
میانگین	1.64	0.92	0.15	3.91	52.2	2.05
انحراف معیار	1.13	0.97	0.3	2.23	1.58	1.52
گونه	**جرد ایرانی**					
سایت نمونه‌برداری	ایستگاه اول	ایستگاه دوم	ایستگاه سوم	ایستگاه اول	ایستگاه دوم	ایستگاه سوم
تعداد	6	5	6	6	5	5
عنصر		جیوه			آرسنیک	
میانگین	2.47	1.48	0.35	4.18	2.44	0.5
انحراف معیار	0.83	0.69	0.49	1.53	1.77	0.71



شکل ۱- مقایسهٔ غلظت آرسنیک و جیوه بین ایستگاه‌ها و دو گونهٔ جربیل هندی (■) و جرد ایرانی (□).
Figure 1. Comparison of As and Hg among sampling sites and Indian gerbil (■) and Persian jird (□)



شکل ۲- مقایسهٔ غلظت آرسنیک و جیوه در گونه‌های صید شده

Figure 2. Comparison of As and Hg in collected samples

جدول ۲- میانگین اندازه‌گیری غلظت جیوه و آرسنیک در مطالعات قبلی (g/gμ وزن خشک)

Table 2. Average measured concentrations of Hg and As in previous studies (g/gμ dry weight)

نام علمی	کشور	نوع آلودگی	آرسنیک	جیوه	منبع
Apodemus sylvaticus	پاویا، ایتالیا (ذخیره‌گاه زیست‌کره)	زیستگاه طبیعی	بسیار ناچیز	<1	Canova *et al*. (2024)
Apodemus agrarius	مسکو، روسیه	پارک‌های شهری	0-0.02	گزارش نشده	Belenkova et al. (2025)
Apodemus sylvaticus	بلژیک	مناطق مختلف	گزارش نشده	0.1–2.5	Beernaert et al. (2007)
Apodemus sp. (*A. flavicollis*/*A. sylvaticus*)	اسلواکی	زیستگاه طبیعی	گزارش نشده	0.05	Zábojníková (2024)
Peromyscus melanophrys	مکزیک	فاضلاب کشاورزی	گزارش نشده	0.3-1.5	Mora-Villa et al. (2024)
Apodemus flavicollis/*Myodes glareolus*	چک	منطقهٔ معدنی	گزارش نشده	0.5-3	Durkalec et al. (2024)
Meriones persicus	ایران	معدن مس	گزارش نشده	گزارش نشده	Shahsavari et al. (2019)
Meriones persicus	ایران	معدن مس	1.82-5.2	گزارش نشده	Khazaee et al. (2022)

بحث و نتیجه‌گیری

مو نمایندهٔ یک نشانگر زیستی غیرتهاجمی و آسان‌بردا شت برای ارزیابی بار بدن ا ست و کراتین جانوری از جمله موی جوندگان به‌طور گسترده برای ارزیابی بار مواجهه استفاده می‌شود. برای جربیل هندی هیچ مطالعه‌ای در زمینهٔ اندازه‌گیری جیوه یا آرسنیک در مو یا بافت در پایگاه‌های علمی منتشر نشده است. جربیل هندی در دشت‌های شنی و علف‌زارها زندگی می‌کند و سیستم‌های لانه عمیقی ایجاد می‌کند؛ عمق لانه در تابستان به ۴۵ تا ۵۰ سانتی‌متر می‌رسد. این رفتار لانه‌کنی عمیق باعث تماس مستقیم و مداوم با خاک آلوده می‌شود (Khazaee *et al*., 2022). همچنین رژیم غذایی این گونه شامل ریشه، دانه، پیاز، اجزای سبز گیاهان و حشرات است و در لانه ذخیرهٔ غذایی انجام می دهد یعنی هم از طریق خاک، هم از طریق گیاهان آلوده، و هم از طریق ح شرات در معرض فلزات سنگین قرار می‌گیرد. این گونه آفت مهم ک شاورزی در ا ست و در زمین‌های ک شاورزی که در معرض آفت‌کش‌های آرسنیک‌دار هستند، زندگی می‌کند. این گونه در استان خوزستان که به‌دلیل وجود صنایع نفت، پتروشیمی و فولاد در معرض آلودگی فلزات سنگین قرار دارد نیز حضور دارد. در مطالعه‌ای در اهواز، منابع اصلی آلودگی شامل صنایع فلزی و غیرفلزی، پتروشیمی، فولاد، خطوط لوله، گاز، نفت، و نیشکر بوده و پیشنهاد شده که ارزیابی خطر آرسنیک و جیوه در خاک‌های کشاورزی مناطق مهم خوزستان باید بررسی شود (Jafarian *et al*., 2025). هر دو گونهٔ مورد مطالعه طعمهٔ مهم پرندگان شکاری، روباه‌ها و مارها است. تجمع فلزات سنگین در آنها می‌تواند از طریق بزرگنمایی زیستی به سطوح بالاتر زنجیرهٔ غذایی منتقل شود.

همچنین به‌عنوان مخزن لیشمانیوز با انسان در تماس نزدیک هستند که خود یک دلیل بهداشتی اضافی برای پایش آن محسوب می‌شود (Ramezani Azghandi *et al*., 2021; Shahriari *et al*., 2024). تحقیقات انجام‌شده در معدن مس دره‌زرشک یزد نشان داد که بیشترین غلظت آرسنیک در موی این گونه تجمع می‌یابد و مو یک ماتریس ترجیحی برای پایش آرسنیک در این جونده به‌حساب می‌آید (Khazaee *et al*., 2022). وجود مطالعات معتبر روی جرد ایرانی در معادن کشور امکان مقایسه دو گونهٔ هم‌زیست را فراهم می‌کند (Shahsavar *et al*., 2019; Khazaee *et al*., 2022). چنین مقایسه‌ای می‌تواند تفاوت‌های گونه‌ای در میزان تجمع فلزات را آشکار کند، موضوعی که برای انتخاب گونه شاخص در پایش محیط‌زیستی ایران اهمیت بالایی دارد. میانگین غلظت جیوه در موی جرد ایرانی در این مطالعه ۷۶/۱ میکروگرم بر گرم وزن خشک و در جربیل هندی ۰/۹۶ میکروگرم بر گرم وزن خشک بود. این مقادیر در محدوده‌ای قرار دارند که در سایر مطالعات بر روی جوندگان در مناطق بدون آلودگی صنعتی شدید گزارش شده است؛ برای نمونه، در Apodemus sylvaticus از مناطق طبیعی بلژیک مقادیر ۱/۰ تا ۵/۲ میکروگرم بر گرم وزن خشک ثبت شده است (Beernaert *et al*., 2007). همچنین در گونهٔ *Apodemus* sp. از مناطق معدنی اسلواکی میانگین ۰/۰۵ میکروگرم بر گرم وزن خشک و در مناطق آلوده‌تر تا ۰/۳ میکروگرم بر گرم وزن خشک اندازه‌گیری شده است (Durkalec *et al*., 2024; Zabojnikova *et al*., 2024). از نظر مقایسه با مطالعات انجام شده بر روی همین گونه در ایران، Khazaee و همکاران (۲۰۲۲) غلظت آرسنیک در موی *M. persicus* در معدن مس دره‌زرشک را در محدودهٔ ۱/۸۲ تا ۲/۵ میکروگرم بر گرم وزن خشک گزارش کردند که با میانگین آرسنیک در ایستگاه اول این مطالعه (جرد ایرانی: ۴/۱۸ و جربیل هندی: ۳/۹۱ میکروگرم بر گرم وزن خشک) همخوانی قابل‌توجهی دارد (جدول ۳). این مقایسه نشان می‌دهد که احتمالاً سطح مواجهه با آرسنیک در ایستگاه کشاورزی سیستان با مناطق معدنی کشور قابل رقابت است، که خود نشانه‌ای از شدت آلودگی ناشی از گردوغبار و کاربری اراضی در این منطقه است. Dahmardeh Behrooz و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای روی خارپشت برانت (*Paraechinus hypomelas*) در سیستان، میانگین جیوه در خارهای خارپشت را ۰/۲ میکروگرم بر گرم و در کلیه را ۱۵/۶ میکروگرم بر گرم وزن خشک گزارش کردند. سطوح جیوه اندازه‌گیری‌شده در موی جوندگان این مطالعه به‌طور قابل ملاحظه‌ای از مقادیر خارپشت بالاتر است که بخشی از این تفاوت می‌تواند ناشی از تفاوت در ماتریس اندازه‌گیری (مو در برابر خارهای کراتینی)، رژیم غذایی گوشت‌خواری–حشره‌خواری در برابر دانه‌خواری، میزان تماس با خاک آلوده و زیستگاه باشد. یافته‌های این مطالعه نشان داد که غلظت آرسنیک و جیوه در ایستگاه اول که در زیستگاه‌های طبیعی حوالی نیاتک در نزدیکی کانون های گرد و غبار منطقه به‌طور معنی‌داری بیشتر از ایستگاه سوم که حوالی مناطق مسکونی است بود. جوندگانی که در محیط‌های نزدیک به فعالیت‌های معدنی زندگی می‌کردند، غلظت بیشتری از عناصر سنگین در بافت‌های داخلی و موی خود داشتند (Khazaee *et al*., 2022). کاهش تدریجی غلظت آرسنیک و جیوه از ایستگاه اول به سوم در پژوهش حاضر بیانگر وجود یک شیب آلودگی مرتبط با فاصله از منابع انسانی است. این شیب با توجه به سرعت باد و جهت گسترش گردوغبار در سیستان معنای بیشتری پیدا می‌کند؛ رسوب ذرات معلق بر روی پوشش گیاهی، خاک و آب‌خوران محلی، منجر به افزایش بار آلودگی در مناطق نزدیک‌تر به کانون‌های گردوغبار و زمین‌های کشاورزی می‌شود. این نتیجه از نظر بالینی و کاربردی قابل‌توجه بوده و مطالعات بعدی با حجم نمونهٔ بزرگ‌تر می‌بایست مورد بررسی مجدد قرار گیرد. تأثیر نوع زیستگاه بر بار فلزی جوندگان در مطالعات متعدد دیگری نیز تأیید شده است. Tovar-Sánchez و همکاران (۲۰۱۲) در مقایسه دو گونهٔ جونده هم‌زیستگاه در مناطق معدنی مکزیک نشان دادند که گونه‌هایی با تماس بیشتر با خاک، عناصر سمی بیشتری انباشت می‌کنند. Sánchez-Chardi و همکاران (۲۰۰۷ a,b) نیز برای گونهٔ *Crocidura russula* در اسپانیا نشان دادند که انباشت سرب، جیوه و کادمیم با شدت آلودگی محیطی ایستگاه‌های نمونه‌برداری همبستگی مثبت معنی‌داری دارد. جرد ایرانی به‌عنوان یک گونهٔ همه‌چیزخوار با بخش قابل‌توجهی از رژیم غذایی حشره‌خوار، می‌تواند از طریق مصرف بی‌مهرگان خاکزی که جیوه را از خاک جذب می‌کنند، بار جیوه بیشتری در بدن خود انباشت کند. این الگو با مطالعاتی که نشان می‌دهند جوندگان حشره‌خوار در موقعیت میانی زنجیرهٔ غذایی قرار دارند و در معرض تجمع زیستی جیوه هستند، سازگار است (D'Havé *et al*., 2006). در مقابل، جربیل هندی با رژیم غذایی غالباً دانه‌خوار–گیاه‌خوار، آرسنیک را به‌طور مشابه از طریق گیاهان و خاک آلوده دریافت می‌کند، که توضیح‌دهندهٔ غلظت

آرسنیک مشابه در هر دو گونه است. در مطالعهٔ Khazaee و همکاران (۲۰۲۲) غلظت آرسنیک در موی جرد ایرانی در محیط معدنی در محدودهٔ ۸۲/۱ تا ۲/۵ میکروگرم بر گرم وزن خشک بود که با مقادیر ایستگاه اول در مطالعهٔ حاضر قابل مقایسه است. این همخوانی نشان می‌دهد که منطقهٔ سیستان، به‌دلیل گردوغبار مزمن و احتمالاً کاربرد آفت‌کش‌های آرسنیک‌دار، می‌تواند سطوح مواجهه‌ای مشابه با محیط‌های معدنی ایجاد کند. نتایج این مطالعه نشان داد که جنسیت تأثیر معنی‌داری بر غلظت آرسنیک و جیوه در موی هر دو گونه ندارد. این یافته با برخی مطالعات همخوانی دارد اما با برخی دیگر در تضاد است. Dahmardeh Behrooz و همکاران (۲۰۲۲) در خارپشت برانت نشان دادند که غلظت جیوه در کلیه و عضلات نرها به‌طور معنی‌داری بیشتر از ماده‌ها بود و این تفاوت را به انتقال جیوه از طریق جفت و شیردهی در ماده‌ها نسبت دادند. Sánchez-Chardi و همکاران (۲۰۰۷b) نیز تفاوت جنسیتی معنی‌داری را در انباشت جیوه و کادمیم در *Crocidura russula* گزارش کردند. مطالعاتی با حجم نمونهٔ بزرگ‌تر می‌توانند تأثیر جنسیت را با دقت بیشتری ارزیابی کنند. با این حال، مشاهده اینکه در هر دو گونه، ماده‌ها میانگین آرسنیک و جیوه اندکی بالاتری نسبت به نرها داشتند، می‌تواند نشان‌دهندهٔ اثرات احتمالی هورمون‌های جنسی بر توزیع فلزات در بافت‌ها باشد که باید در مطالعات آتی با حجم نمونهٔ بزرگ‌تر بررسی شود. مطالعات شیمیایی بر روی ذرات معلق سیستان (Rashki *et al*., 2013; Asvad *et al*., 2023) نشان داده‌اند که گردوغبار این منطقه غنی از آرسنیک، کروم، روی و سایر عناصر سمی است. در مطالعه‌ای در منطقهٔ زابل، میانگین غلظت آرسنیک در ذرات معلق کل حدود ۴۷۱/۵ میکروگرم بر مترمکعب ارزیابی شده است (Asvad *et al*., 2023). مقادیر جیوه اندازه‌گیری‌شده در مطالعه حاضر به‌طور قابل‌توجهی کمتر از آستانه‌های سمیت شناخته‌شده برای پستانداران است. غلظت جیوه بیش از ۶۰۰۰ نانوگرم بر گرم وزن خشک در موی خرس‌ها می‌تواند اثرات عصبی تحت‌بالینی ایجاد کند. سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا پایین‌ترین حد راهنمای جیوه در موی انسان را ۱۰۰۰ نانوگرم بر گرم وزن خشک تعیین کرده است (Dietz *et al*., 2011). مقادیر جیوه در موی جوندگان مطالعهٔ حاضر (حداکثر در ایستگاه اول حدود ۲/۵ میکروگرم بر گرم یعنی ۲۵۰۰ نانوگرم بر گرم) به این حد مرجع نزدیک‌تر است و اگرچه هنوز زیر آستانهٔ سمیت مستقیم قرار دارد، اما لزوم پایش مستمر را نشان می‌دهد. برای آرسنیک نیز، اگرچه حدود مرجع اختصاصی برای موی جوندگان به‌طور گسترده تعریف نشده است، اما مقادیر ایستگاه اول از مقادیر گزارش‌شده برای جوندگان در مناطق آلوده اروپا فراتر می‌رود. این یافته نگران‌کننده است زیرا جوندگان، به‌عنوان طعمهٔ مهم برای پرندگان شکاری، روباه‌ها و مارها، می‌توانند از طریق بزرگ‌نمایی زیستی غلظت‌های بالاتری از این عناصر را به سطوح بالاتر زنجیرهٔ غذایی منتقل کنند. با توجه به اینکه سیستان یکی از شدیدترین کانون‌های گردوغبار جهان با بیش از ۱۶۰ روز گردوغبار در سال است و گردوغبار این منطقه غنی از عناصر سمی نظیر آرسنیک و جیوه است (Rashki *et al*., 2013; Dahmardeh *et al*., 2017; Asvad *et al*., 2023)، این مطالعه برای اولین بار اثر احتمالی مستقیم این پدیدهٔ اقلیمی بر انباشت زیستی این عناصر در حیات وحش بومی منطقه را گزارش می‌دهد. از آنجا که مطالعات پیشین در سیستان عمدتاً بر ترکیب شیمیایی ذرات معلق هوا و ریسک سلامت انسانی متمرکز بوده‌اند (Dahmardeh Behrooz *et al*., 2022; Badeenezhad *et al*., 2023)، پژوهش حاضر با استفاده از جوندگان بومی به‌عنوان شاخص زیستی، شکاف مهمی را در دانش بوم‌سم‌شناسی این منطقه بحران‌زده پر می‌کند و زمینه را برای طراحی برنامه‌های پایش زیستی بلندمدت فراهم می‌آورد.

محدودیت‌های پژوهش

یکی از محدودیت‌های این مطالعه، حجم نسبتاً محدود نمونه‌ها بود که پس از تفکیک براساس گونه، ایستگاه نمونه‌برداری و جنسیت، در برخی گروه‌ها به تعداد کمی نمونه منجر شد. این موضوع ممکن است توان آماری برای شناسایی تفاوت‌های واقعی را کاهش داده و قابلیت تعمیم نتایج را محدود کند. بنابراین، انجام مطالعات آتی با حجم نمونهٔ بیشتر و توزیع متوازن‌تر نمونه‌ها برای تأیید نتایج و افزایش قدرت استنباط آماری توصیه می‌شود. در مطالعات آینده، با نمونه‌برداری از گردوغبار، خاک، اراضی کشاورزی و سایر منابع بالقوه و استفاده از روش‌های منشأیابی، سهم نسبی هر یک از منابع آلاینده به‌طور دقیق‌تر تعیین شود.

ملاحظات اخلاقی

تمام مراحل صید و نمونه‌گیری با مجوز کمیتهٔ اخلاق در پژوهش IR.UOZ.REC.1404.012 دانشگاه زابل انجام شد.

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهش وفناوری دانشگاه زابل انجام شد.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به‌طور مساوی در کلیهٔ مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان (نویسنده مسئول) قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به‌خاطر ارائهٔ نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود. از آقایان دکتر حسین براهویی، مهندس فرزاد کیخا و دکتر مهدی مهماندوست که در اجرای فعالیت‌های میدانی همکاری نموده‌اند صمیمانه سپاسگزاریم. همچنین از آقای دکتر هاشم خندان‌بارانی برای راهنمایی در اجرای بخش آزمایشگاهی و بازبینی مقاله تقدیر و تشکر می‌شود.

References

Asvad, S.R., Esmaili-Sari, A., Bahramifar, N., Dahmardeh Behrooz, R., Paschalidou, A.K., Kaskaoutis, D.G., 2023. Heavy metals contamination status and health risk assessment of indoor and outdoor dust in Ahvaz and Zabol cities, Iran. Atmospheric Pollution Research 14(4), 101727.

Badeenezhad, A., Parseh, I., Veisi, A., Rostami, S., Ghelichi-Ghojogh, M., Badfar, G., Abbasi, F., 2023. Short-term exposure to some heavy metals carried with PM_{10} and cardiovascular system biomarkers during dust storm. Scientific Reports 13, 6146.

Bandouchova, H., Novotna Kruzikova, K., Zukal, J., Linhart, P., Sedlackova, J., Veitova, L., Kalocsanyiova, V., Pikula, J., Svobodova, Z., 2024. Biomonitoring metals and metalloids in wild mammals: invasive versus non-invasive sampling. Ecotoxicology 33(8), 948-958.

Beernaert, J., Schiers, J., Leirs, H., Blust, R., Verhagen, R., 2007. Non-destructive pollution exposure assessment by means of wood mice hair. Environmental Pollution 145, 443-451.

Boev, B., Jovancevic, S., Stefkov, G., Kostadinova, G., Baeva, A., 2020. Mercury in hair of mammoth and other prehistorical mammals as a proxy of Hg level in the environment associated with climate changes. Applied Sciences 10(23), 8664.

Canova, L., Maraschi, F., Profumo, A. and Sturini, M., 2024. Analysis of environmental contamination by metals using Wood mouse *Apodemus sylvaticus* hair as a biomonitor: an appraisal. Environments 11, 281.

Dahmardeh Behrooz, R., Esmaili-Sari, A., Bahramifar, N., Kaskaoutis, D.G., 2017. Analysis of the TSP, PM10 concentrations and water-soluble ionic species in airborne samples over Sistan, Iran during the summer dusty period. Atmospheric Pollution Research 8(3), 403-417.

Dahmardeh Behrooz, R., Poma, G., Barghi, M., 2022. Non-destructive mercury exposure assessment in the Brandt's hedgehog (*Paraechinus hypomelas*): spines as indicators of endogenous concentrations. Environmental Science and Pollution Research 29, 560502-56510.

Dahmardeh Behrooz, R,. Poma, G., 2021. Evaluation of mercury contamination in Iranian wild cats through hair analysis. Biological Trace Element Research 199(1), 166-172.

Darvishi Boloorani, A., Nabavi, S.O., Azizi, R., Bahrami, H.A., Mirzapour, F., 2022. Dust storm frequency and long-term variability in the Sistan Basin. Aeolian Research 54, 100764.

D'Havé, H., Scheirs, J., Mubiana, V.K., Verhagen, R., Blust, R., De Coen, W., 2006. Non-destructive pollution exposure assessment in the European hedgehog (*Erinaceus europaeus*): II. Hair and spines as indicators of endogenous metal and As concentrations. Environmental Pollution 142, 438-448.

Durkalec, M., Nawrocka, A., Zmudzki, J., Filipek, A., Niemcewicz, M., Posyniak, A., 2019. Concentration of mercury in the livers of small terrestrial rodents from rural areas in Poland. Molecules 24, 4108.

Hu, X., Zhang, Y., Luo, J., Wang, T., Lian, H., Ding, Z., 2011. Bioaccessibility and health risk of arsenic, mercury and other metals in urban street dusts from a mega-city, Nanjing, China. Environmental Pollution 159, 1215-1221.

Ishak, A.R., Ali Rashid, F.S., Khalid, N., Mohamad, S., 2021. Sample preparation method for metal(loid) contaminant quantitation in rodent hair. Environmental Science and Pollution Research 28, 46271–46281.

Jafarian, F., Payandeh, Kh., Nazarpour, A., Gholami, A., Mohsenifar, K., 2025. Evaluation of environmental pollution indices of heavy metals in soil around Khuzestan Steel Co. Iranian Journal of Research in Environmental Health 11(1), 111-129.

Karami, M., Ghadirian, T., Faizolahi, K., 2015. The Atlas of the Mammals of Iran. Department of the Environment of Iran, Tehran, Iran. (In Persian)

Kaskaoutis, D.G., Rashki, A., Francois, P., Dumka, U.C., Houssos, E.E., Legrand, M., 2016. Meteorological controls and source-receptor relationships of mineral dust over Iran. Atmospheric Environment 139, 91–108.

Khazaee, M., Hamidian, A.H., Alizadeh-Shabani, A., Ashrafi, S., Mirjalili, S.A.A., Esmaeilzadeh, E., 2022. Accumulation of heavy metals and As in liver, hair, femur, and lung of Persian Jird (*Meriones persicus*) in Darreh Zereshk copper mine. International Journal of Environmental Studies 79(5), 883-900.

Komarnicki, G.J.K., 2000. Tissue, sex and age-specific accumulation of heavy metals (Zn, Cu, Pb, Cd) by populations of the mole (*Talpa europaea* L.) in a central urban area. Chemosphere 41, 1593-1602.

Mohammadi, S., Kaboli, M., Aliabadian, M., Mohammadi, V. 2011. Burrow configuration of Persian jird *Meriones persicus* Blanford, 1875 (Rodentia: Muridae, Gerbillinae). *Mamm Biol* 76, 515-517.

Mohammadi, S., Sabaghzadeh, A., Imani Harsini, J., Behdarvand, N., Pahlavanravi, A., Mir, A., 2014. Identification of effective parameters on distribution of *Tatera indica* Hardwicke, 1807 in arid and semi-arid habitats using Binary Logistic Regression method (Case study: Zabol region). Arid Biome 4(1), 31-41.

Mora-Villa, L.A., Leon-Paniagua, L., Garcia-Martinez, R., Arroyo-Cabrales, J., 2024. Presence of mercury in an arid zone of Mexico: a perspective based on biomonitoring of mammals from three trophic guilds. Biology 13, 811.

Morton, J., Carolan, V.A., Gardiner, P.H.E., 2002. Removal of exogenously bound elements from human hair by various washing procedures and determination by ICP-MS. Analytica Chimica Acta 455(1), 23-24.

Okati, N., Rezaee, M., 2013. Heavy metals concentrations in different tissues of Persian Jird (*Meriones persicus*) in Sistan region. International Research Journal of Applied and Basic Sciences 10, 1272-1276.

Pérez-Álvarez, I., Galicia-Martínez, S., Ortega-Macías, A.G., Paniagua-Michel, J., Martínez-Rivera, I., Arenas-Huertero, F., 2024. Presence of mercury in an arid zone of Mexico: biomonitoring of mammals from three trophic guilds. Biology 13(10), 811.

Ramezan Azghandi, Sh., Farashi, A., Najjari, M., Hosseini, M., 2021. Habitat modeling of *Meriones persicus* species as a reservoir of leishmaniasis in Iran. Journal of Research in Environmental Health 7, 87-94.

Rashki, A., Eriksson, P.G., Rautenbach, C.deW., Kaskaoutis, D.G., Grote, W., Dykstra, J., 2012. Assessment of chemical and mineralogical characteristics of airborne dust in the Sistan region, Iran. Chemosphere 90, 227-236.

Sánchez-Chardi, A., Marques, C.C., Nadal, J., Mathias, M.L., 2007a. Metal bioaccumulation in the greater white-toothed shrew, Crocidura russula, inhabiting an abandoned pyrite mine site. Chemosphere 67, 121-130.

Sánchez-Chardi, A., López-Fuster, M.J., Nadal, J., 2007b. Bioaccumulation of lead, mercury, and cadmium in the greater white-toothed shrew, *Crocidura russula*, from the Ebro Delta (NE Spain): sex- and age-dependent variation. Environmental Pollution 145, 7-14.

Sanchez-Chardi, A., Peñarroja-Matutano, C., Borrás, M., Nadal, J., 2009. Bioaccumulation of metals and effects of a landfill in small mammals. Science of the Total Environment 407, 3272-3280.

Shahsavari, A., Hamidian, A.H., Ashrafi, S. and Mirjalili, S.A.A., 2019. Heavy metal accumulation in tissues of Persian Jird (*Meriones persicus*) in Darreh Zereshk copper mine, Yazd, Iran. Environmental Monitoring and Assessment, 23, 3860-3870.

Shahriari, F., Hemami, M.R., Azizi, K., Hanafi-Bojd, A.A., Niknaddaf, Z., 2024. Assessment of ecological factors impacting the distribution of cutaneous leishmaniasis in Fars Province. Iranian Journal of Applied Ecology 13, 55-68.

Sobańska, M.A. 2005. Wild boar hair (*Sus scrofa*) as a non-invasive indicator of mercury pollution. Science of the Total Environment 339(1-3), 81-88.

Soleimani-Sardo, M., Dahmardeh Behrooz, R., Broomandi, P., Munir, M., Kim, J.R. Rashki, A., 2023. Heavy metal pollution levels and health risk assessment of dust storms in Jazmurian region, Iran. Scientific Reports 13, 7372.

Talmage, S.S., Walton, B.T., 1991. Small mammals as monitors of environmental contaminants. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology 119, 47-145.

Tovar-Sánchez, E., Cervantes, L.T., Martínez, C., Rojas, E., Valverde, M., Ortiz-Hernández, M.L., Mussali-Galante, P., 2012. Comparison of two wild rodent species as sentinels of environmental contamination by mine tailings. Environmental Science and Pollution Research 19, 1677-1686.

Verrey, R., Soto-Jiménez, M., Zamora-Arellano, F., García-Hernández, J., Ruelas-Inzunza, J., Guitron-Flores, B., 2019. A new washing procedure for inorganic element analysis of hair. Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology 29, 240-250.

Wren, C.D., 1986. A review of metal accumulation and toxicity in wild mammals: I. Mercury. Environmental Research 40, 210-244.

Zábojníková, L., 2024. Seasonal and age-dependent differences in mercury concentrations in Apodemus sp. in the north-western region of Slovakia. Environmental Science and Pollution Research 31, 10521-10532.